



Filière  
Génie Informatique Embarquée

Département  
Génie informatique

# RAPPORT DE PROJET

## DE FIN D'ÉTUDE

# S U J E T

# Smart Building with AI-Driven Support and IoT Systems

<b>Encadré par</b>	:	Pr Mouhcine KODAD Pr Mostafa AZIZI Pr Omar MOUSSAOUI M Mohammed YACOUBI
<b>Réalisé par</b>	:	Douae LAMRINI Wiam EL-KHANCHOUI
<b>Soutenu le</b>	:	Samedi 05 avril 2025
<b>Devant le jury</b>	:	Pr. Rachid Oubrahim M. Mohammed Yacoubi M. Mohammed Challi

## Dédicaces

**Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers.**

- **À mes très chers parents :**

Que ce travail soit l'expression de ma profonde reconnaissance pour vos sacrifices, votre soutien moral et matériel inestimable. Vous avez tout fait pour mon bonheur et ma réussite. Que Dieu vous préserve en bonne santé et vous accorde une longue vie.

- **À mes frères, Ahmed Amine et Oubay :**

Vous avez toujours été là pour m'aider et m'encourager. Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès. Que Dieu vous protège et vous garde.

- **À mes amis et à toute la promotion GIE à l'EST :**

Merci pour ces moments inoubliables, pour le soutien, les rires et les défis partagés. Ce parcours a été une belle aventure grâce à vous.

*Douaa Lamrini*

---

Je dédie cet ouvrage à mes parents qui ont toujours cru en moi et m'ont apporté un soutien inconditionnel tout au long de mon parcours. Leur amour et leur sacrifice sont la source de ma persévérance et de mon succès.

À mes frères et sœurs, dont les encouragements et la gentillesse ont été une motivation précieuse à chaque étape de ce projet.

À mes professeurs et superviseurs pour leur soutien, leurs conseils éclairés et leur partage de connaissances, qui ont enrichi mon éducation et ma passion pour la technologie.

Enfin, à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce projet et m'ont inspiré à faire de mon mieux.

Avec toute ma gratitude et mon respect.

*El Khanchouch Wiam*

---

## Remerciement

En préambule à ce rapport, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes dont l'accompagnement et le soutien ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à l'ensemble du corps professoral de l'École Supérieure de Technologie d'Oujda (ESTO), ainsi qu'aux intervenants professionnels responsables de la formation en Génie Informatique Embarqué, pour la qualité de leur enseignement, leur engagement pédagogique et leur disponibilité tout au long de notre parcours académique.

Nous exprimons notre reconnaissance particulière à **Monsieur Kodad Mohcine**, **Monsieur Mostafa Azizi**, **Monsieur Omar Moussaoui** et **Monsieur Mohammed Yacoubi**, qui nous ont encadrées durant ce projet de fin d'études. Leur expertise, leurs conseils avisés et leur accompagnement rigoureux ont été essentiels à la réalisation de ce travail. Leurs orientations méthodologiques et leurs recommandations techniques nous ont permis d'approfondir nos compétences et d'améliorer significativement la qualité de notre projet.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour le temps accordé à l'évaluation de notre travail et pour leurs observations enrichissantes qui contribueront à notre progression académique et professionnelle.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à nos familles et amis, dont le soutien indéfectible, l'encouragement constant et la bienveillance nous ont apporté une précieuse motivation tout au long de cette aventure.

## Résumé

Notre projet de fin d'études, « *Smart Building with AI-Driven Support and IoT Systems* », vise à concevoir un immeuble intelligent intégrant les technologies d'IA et d'IOT afin d'optimiser la sécurité, la gestion énergétique et le confort des résidents.

L'immeuble se compose de trois étages, chacun abritant une maison connectée dotée de systèmes automatisés assurant le contrôle des accès, la surveillance environnementale et la gestion des équipements domestiques. Grâce à une infrastructure basée sur des microcontrôleurs, les maisons intègrent des capteurs intelligents permettant la détection des gaz, de la température, de l'humidité et des mouvements, ainsi que des systèmes d'alerte et d'éclairage interactifs.

À l'extérieur, le bâtiment comprend un système de gestion d'accès sécurisé, un ascenseur automatisé, ainsi qu'un jardin intelligent équipé d'un système d'irrigation contrôlé par des capteurs d'humidité du sol.

En complément des fonctionnalités matérielles, une application Web dédiée permet aux résidents d'interagir avec l'écosystème du bâtiment. Elle comprend plusieurs modules : une interface d'accueil, un guide interactif, une galerie multimédia, un espace de retour d'expérience et un chatbot multilingue (français, anglais, arabe) offrant une assistance automatisée. L'accès à cette plateforme est restreint aux résidents via un système d'authentification sécurisé.

Sur le plan technologique, le projet repose sur une architecture backend utilisant Python, SQL, JSON et des fichiers CSV, tandis que le frontend est développé en HTML, CSS, Bootstrap, JavaScript et jQuery.

Ce projet illustre l'application des technologies intelligentes dans la conception de bâtiments connectés, favorisant sécurité, efficacité énergétique et autonomie des utilisateurs tout en offrant une infrastructure évolutive adaptable aux besoins futurs.

---

**Mots-clés :** IOT, IA, jQuery, JSON, SQL, HTML, JavaScript, CSS, CSV, Bootstrap, Python.

## ملخص

يهدف مشروع نهاية دراستنا، «Smart Building with AI-Driven Support and IoT Systems»، إلى تصميم مبني ذكي يدمج تكنولوجيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء لتعزيز الأمان، وإدارة الطاقة، وراحة السكان.

يتكون المبني من ثلاثة طوابق، يحتوي كل واحد منها على منزل متصل مزود بأنظمة مؤتمنة تحكم في الوصول، وترافق البيئة، وتدير الأجهزة المنزلية. بفضل بنية تحتية تعتمد على وحدات التحكم الدقيقة، يتم دمج مجموعة من المستشعرات الذكية للكشف عن الغازات، ودرجة الحرارة، والرطوبة، والحركة، بالإضافة إلى أنظمة إنذار وإضاءة تفاعلية.

في الخارج، يحتوي المبني على نظام أمان متتطور لإدارة الوصول، ومصدع أوتوماتيكي، وحديقة ذكية مزودة بنظام رعي تلقائي يعتمد على مستشعرات رطوبة التربة.

بالإضافة إلى الجوانب التقنية، تم تطوير تطبيق ويب يسمح للسكان بالتفاعل مع النظام الذكي للمبني. يتضمن هذا التطبيق عدة أقسام: واجهة رئيسية، دليل تفاعلي، معرض صور، قسم لتقديم الملاحظات، وروبوت محدثة متعددة اللغات (العربية، الفرنسية، الإنجليزية) لتوفير الدعم الآلي. كما يتم تأمين الوصول إلى هذه المنصة من خلال نظام مصادقة محكم يضمن أن الأشخاص غير المقيمين لا يمكنهم استخدامه.

من الناحية التكنولوجية، يعتمد المشروع على بنية خلفية (Backend) تستخدم Python، SQL، JSON، وملفات CSV ، بينما يعتمد الواجهة الأمامية (Frontend) على HTML، CSS، JavaScript، Bootstrap، وjQuery.

يمثل هذا المشروع تطبيقاً عملياً لتقنيات الذكاء في تصميم المبني المتصلة، مما يعزز الأمان، وكفاءة استهلاك الطاقة، واستقلالية المستخدمين، مع توفير بنية تحتية قابلة للتطوير تكيف مع الاحتياجات المستقبلية.

---

**الكلمات المفتاحية:** إنترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي، CSV، CSS، JavaScript، HTML، SQL، JSON، jQuery، Python، Bootstrap

## Abstract

Our final year project, “*Smart Building with AI-Driven Support and IoT Systems*”, aims to design a smart building integrating advanced technologies in artificial intelligence and Internet of Things to enhance security, energy management, and resident comfort.

The building consists of three floors, each housing a connected home equipped with automated systems that control access, monitor the environment, and manage household devices. Thanks to an infrastructure based on microcontrollers, a range of smart sensors is integrated to detect gases, temperature, humidity, motion, and other safety-related parameters, in addition to automated lighting and alarm systems.

On the exterior, the building features a sophisticated access management system, an automatic elevator, and a smart garden equipped with an automatic irrigation system based on soil moisture sensors.

In addition to the technical aspects, we developed a web application that allows residents to interact with the smart building system. This application includes several sections: Home for the introduction, Guide for explanations, Gallery for images, Feedback to collect users' opinions, and Syndicate, a multilingual chatbot (Arabic, French, and English) for automated support. Access to this platform is secured with a rigorous authentication system, ensuring that only residents can use it.

On the technological side, the project relies on a backend structure using Python, SQL, JSON, and CSV files, while the frontend is built using HTML, CSS, Bootstrap, JavaScript, and jQuery.

This project represents a practical application of smart technologies in building design, enhancing security, energy efficiency, and user independence, while providing a scalable infrastructure that can adapt to future needs.

---

**Keywords:** Internet of Things, Artificial Intelligence, jQuery, JSON, SQL, HTML, JavaScript, CSS, CSV, Bootstrap, Python.

## Liste des figures

Figure 1 : Diagramme de Gantt .....	14
Figure 2 : Fonctionnement d'IOT .....	18
Figure 3 : Architecture d'IOT .....	19
Figure 4 : Capteur MQ135 .....	23
Figure 5: Capteur MG811 .....	24
Figure 6 : Capteur DHT11 .....	24
Figure 7 : Capteur LDR .....	25
Figure 8: Capteur PIR .....	25
Figure 9 : Capteur de flame .....	26
Figure 10: Capteur de son .....	26
Figure 11 : Capteur d'humidité du sol .....	27
Figure 12 : Capteur ultrason .....	27
Figure 13 : Capteur de niveau de l'eau .....	28
Figure 14 : ESP8266 .....	29
Figure 15 : ESP32 .....	30
Figure 16: Microcontrôleur Arduino UNO Rev3 .....	30
Figure 17 : Carte Raspberry pi 5 .....	31
Figure 18 : Diagramme d'Exigences SysML pour le Bâtiment .....	33
Figure 19 :Diagramme de cas d'utilisation .....	34
Figure 20:Diagramme de séquence .....	35
Figure 21:Diagramme de bloc interne .....	35

## Abréviaison

AI	Artificial Intelligence
IOT	Internet of Things
ESP8266	Espressif Systems 8266
ESP32	Espressif Systems 32
Wi-Fi	Wireless Fidelity
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
RFID	Radio Frequency Identification
JSON	JavaScript Object Notation
LDR	Light Dependent Resistor
PIR	Passive Infrared Sensor
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I2C	Inter-Integrated Circuit
HTML	Hypertext Markup Language
CSS	Cascading Style Sheets
CSV	Comma-Separated Values
SQL	Structured Query Language
JQuery	JavaScript Query
SysML	Systems Modeling Language
OMG	Object Management Group
UML	Unified Modeling Language
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
LPWAN	Low Power Wide Area Network

## Table des matières

Dédicaces	2
Remerciement	3
Résumé	4
ملخص	5
Abstract	6
Liste des figures	7
Abréviation	8
Table des matières	9
Introduction Générale	11
Chapitre 1 : Contexte Général du Projet	13
Introduction	13
1. Problématiques	13
2. Planification du projet	14
3. Présentation du bâtiment intelligent	15
4. Fonctionnalités principales	15
Conclusion	16
Chapitre 2 : Généralités sur l'IoT et l'Intelligence Artificielle	17
Introduction	17
1. Internet des Objets (IoT)	17
1.1. Définition	17
1.2. Fonctionnement de l'IoT	18
1.3. Architecture de l'IoT	18
1.4. Importance et applications dans les bâtiments intelligents	19
2. Intelligence Artificielle	19
Conclusion	21
Chapitre 3 : Analyse et Conception de la Solution	22
Introduction	22
1. Analyse des besoins	22
2. Choix des outils et technologies	23
3. Architecture globale du système	32
4. Modélisation avec SysML	33
▪ Diagramme d'exigences :	33
▪ Diagramme de cas d'utilisation :	34

▪ Diagramme de séquence :	34
▪ Diagramme de bloc interne :	35
Conclusion	36
Chapitre 4 : Réalisation, Tests et Validation	37
Introduction	37
1. Implémentation	37
2. Tests et validation	38
Conclusion	40
Conclusion Générale	42
Annexes .A.	44
Annexes .B.	45
Annexes .C.	46
Références	49

## Introduction Générale

À l'ère de la transformation numérique, l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) et de l'Intelligence Artificielle (IA) dans les infrastructures urbaines redéfinit les standards de l'habitat moderne. Les bâtiments intelligents, ou "smart buildings", utilisent des technologies avancées pour automatiser et optimiser la gestion des systèmes tels que le chauffage, la ventilation, l'éclairage et la sécurité, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et le confort des occupants. Selon une étude publiée en janvier 2023, l'alliance de l'IoT et de l'IA s'impose comme un pilier pour améliorer l'efficience énergétique des bâtiments et les rendre plus durables. [1]

Dans ce contexte, notre projet, intitulé "Smart Building with AI-Driven Support and IoT Systems" (W.D.B), vise à concevoir et développer un immeuble intelligent de trois étages, chaque niveau abritant une résidence équipée de dispositifs connectés. Ces dispositifs, basés sur des microcontrôleurs tels que l'ESP32, l'ESP8266 et l'Arduino, permettront une gestion automatisée et sécurisée des différentes fonctionnalités domestiques, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité de vie des résidents. L'utilisation de ces technologies est soutenue par diverses recherches académiques et applications pratiques. Par exemple, une étude récente explore l'application des technologies de l'IoT, du Big Data et de l'IA pour optimiser la gestion environnementale dans les bâtiments intelligents, en se concentrant sur la prédiction de la qualité de l'air et l'indice de chaleur pour améliorer le bien-être des occupants. De plus, l'intégration de capteurs IoT dans les bâtiments intelligents permet une réponse en temps réel à la demande énergétique et optimise la distribution d'énergie de manière durable. [2] [3]

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres majeurs :

- Le premier chapitre pose le contexte général du projet, en présentant les concepts fondamentaux du bâtiment intelligent, ses objectifs et les fonctionnalités attendues. Ce chapitre permet de comprendre les motivations et les enjeux qui ont guidé notre démarche.
- Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur l'IoT et l'Intelligence Artificielle. Il définit ces technologies, décrit leur fonctionnement et leur architecture, et met en lumière leur rôle essentiel dans la mise en place de bâtiments intelligents modernes.
- Le troisième chapitre aborde l'analyse et la conception de la solution. Il détaille l'étude des besoins, le choix des outils et composants, l'architecture globale du système, ainsi

que la modélisation fonctionnelle et structurelle à l'aide du langage SysML, incluant plusieurs types de diagrammes (exigences, cas d'utilisation, séquence, bloc interne).

- Le quatrième chapitre est dédié à la réalisation, aux tests et à la validation. Il décrit les étapes de mise en œuvre du système, les scénarios de tests appliqués ainsi que les résultats obtenus, afin de garantir la fiabilité et la pertinence de la solution développée.

En adoptant ces technologies de pointe, notre projet s'inscrit dans une démarche visant à créer des environnements de vie plus sûrs, plus confortables et plus respectueux de l'environnement, tout en répondant aux défis contemporains liés à l'urbanisation croissante et aux exigences de durabilité.

# Chapitre 1 : Contexte Général du Projet

## Introduction

Le projet "Smart Building with AI-Driven Support and IoT Systems" vise à concevoir un immeuble intelligent de trois étages, intégrant des technologies avancées pour optimiser la gestion des ressources et améliorer le confort des occupants. Cette initiative est motivée par la nécessité croissante de bâtiments capables de répondre aux défis énergétiques et environnementaux actuels. En effet, les bâtiments intelligents utilisent des systèmes automatisés pour gérer efficacement des éléments tels que le chauffage, la ventilation, l'éclairage et la sécurité, contribuant ainsi à une réduction significative de la consommation énergétique.

Selon un article publié par *Buildings.com*, l'intégration de capteurs IoT dans les bâtiments intelligents permet de préserver et de prioriser les ressources tout en facilitant la maintenance proactive grâce au suivi en temps réel des données d'utilisation. [4]

De plus, l'adoption de l'IA dans la gestion des bâtiments offre des avantages tels que l'optimisation de l'énergie, la maintenance prédictive et l'amélioration de l'efficacité opérationnelle. [5]

Les objectifs spécifiques de ce projet incluent l'automatisation du contrôle des accès, la surveillance environnementale, la gestion optimisée des pièces, la sécurité incendie, l'automatisation de l'ascenseur, la gestion de l'irrigation du jardin et le développement d'une application web interactive intégrant un chatbot multilingue.

Ces fonctionnalités visent à créer un environnement résidentiel plus sûr, confortable et écoénergétique, en phase avec les avancées technologiques actuelles dans le domaine des bâtiments intelligents.

### 1. Problématiques

Face à l'expansion urbaine et à l'urgence climatique, les bâtiments résidentiels doivent concilier efficacité énergétique, sécurité et confort des occupants [6]. Cependant, les infrastructures traditionnelles, souvent rigides et énergivores, peinent à répondre à ces exigences. Les smart buildings émergent comme une alternative, mais leur implémentation soulève des interrogations clés :

*Interopérabilité* : Comment unifier des systèmes IoT disparates (capteurs, gestion d'énergie, contrôle d'accès) tout en garantissant une communication fluide entre protocoles [7]?

*Adoption utilisateur* : Quels modèles d'interface permettent de simplifier l'interaction avec des technologies complexes pour des résidents non experts ?

*Évolutivité et coût* : Comment concevoir une architecture scalable sans surcoûts majeurs, notamment pour les rénovations [8]?

Notre projet vise à résoudre ces tensions en proposant un cadre technologique modulaire, centré sur l'IA embarquée et une gouvernance des données transparente. L'enjeu final est de transformer le bâtiment en un écosystème à la fois performant, résilient et humain-centré.

## 2. Planification du projet

La réussite d'un projet embarqué exige une planification rigoureuse pour concilier développement logiciel, contraintes matérielles et validation système [9]. Structuré en phases clés (spécification, prototypage, intégration, tests), notre planning s'appuie sur un *diagramme de Gantt* pour synchroniser les tâches multidisciplinaires (ex. : développement firmware, tests de robustesse) et anticiper les goulots d'étranglement [10]. Cet outil, couplé à une méthodologie Agile ou V-cycle selon les besoins, optimise l'allocation des ressources et le respect des délais critiques [11].

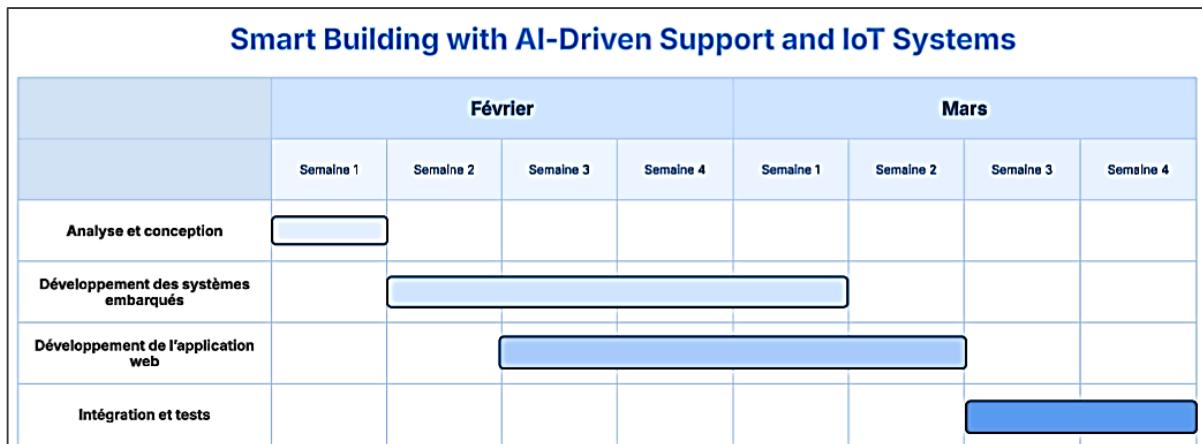


Figure 1 : Diagramme de Gantt

### **3. Présentation du bâtiment intelligent**

Le projet "Smart Building with AI-Driven Support and IoT Systems" concerne la conception d'un immeuble intelligent de trois étages, intégrant des technologies avancées pour optimiser la gestion des ressources et améliorer le confort des occupants.

Chaque étage abrite une résidence équipée de dispositifs connectés, permettant une automatisation efficace des systèmes domestiques. Les microcontrôleurs *ESP32* et *ESP8266* sont largement utilisés dans les projets IoT en raison de leur connectivité Wi-Fi et Bluetooth, ainsi que de leur capacité à gérer des capteurs et des actionneurs variés.

Selon Nabto, l'*ESP32* offre une connectivité Wi-Fi et Bluetooth pour les dispositifs embarqués, ce qui le rend idéal pour les applications IoT. [12]

De plus, l'*ESP8266* est reconnu pour sa simplicité d'utilisation et sa compatibilité avec divers capteurs, facilitant ainsi le développement de solutions domotiques. [13]

L'intégration de ces technologies dans le bâtiment intelligent permet une gestion optimisée de l'énergie, une surveillance en temps réel des conditions environnementales et une amélioration significative de la sécurité et du confort des résidents.

### **4. Fonctionnalités principales**

Notre projet intègre diverses fonctionnalités avancées pour améliorer la sécurité, le confort et l'efficacité énergétique de l'immeuble. Le contrôle d'accès repose sur l'utilisation d'un clavier matriciel 4x4 connecté à une carte Arduino, permettant la saisie sécurisée de codes. Les informations sont affichées sur un écran LCD I2C, offrant une interface utilisateur claire et intuitive. Un servomoteur est utilisé pour actionner le mécanisme de verrouillage de la porte, assurant ainsi une sécurité renforcée. Des tutoriels détaillés sur l'intégration de ces composants sont disponibles sur des sites spécialisés tels que Robotique Tech.

La surveillance environnementale est assurée par une combinaison de capteurs. Le capteur DHT11 mesure la température et l'humidité, tandis que le capteur MQ135 détecte la qualité de l'air en identifiant des gaz nocifs tels que l'ammoniac et le monoxyde de carbone. Ces capteurs, associés à un capteur de flamme, permettent une surveillance en temps réel des conditions environnementales, contribuant ainsi à la sécurité des occupants.

La gestion des pièces est optimisée grâce à l'utilisation de LED et de boutons, permettant un contrôle personnalisé de l'éclairage. Des capteurs de mouvement détectent la présence des occupants, automatisant ainsi l'activation ou la désactivation des lumières pour une efficacité énergétique accrue.

Le système d'ascenseur est contrôlé par une carte Arduino équipée d'un lecteur RFID pour l'identification des utilisateurs autorisés. Un affichage Dot Matrix fournit des informations en temps réel sur l'état de l'ascenseur, tandis qu'un moteur assure le déplacement entre les étages.

Le jardin intelligent intègre une pompe contrôlée par un capteur d'humidité du sol, assurant une irrigation automatique en fonction des besoins réels des plantes. Cette approche optimise la consommation d'eau et favorise une gestion durable des ressources.

Enfin, le projet comprend un chatbot multilingue basé sur JSON, accessible via une application web dédiée aux résidents. Ce chatbot facilite la communication et la gestion des services au sein de l'immeuble, améliorant ainsi l'expérience des occupants.

## Conclusion

En synthèse, l'intégration de l'IOT et de l'IA dans le projet "Smart Building with AI-Driven Support and IoT Systems" vise à transformer un immeuble traditionnel en un environnement intelligent, sécurisé et écoénergétique.

Cette approche permet non seulement d'optimiser la consommation énergétique et d'améliorer le confort des occupants, mais aussi de renforcer la sécurité grâce à des systèmes automatisés de surveillance et de contrôle d'accès. Comme le souligne une analyse publiée par Informatiquenews.fr, l'alliance de l'IOT et de l'IA s'impose comme un pilier pour améliorer l'efficience énergétique des bâtiments et les rendre plus intelligents et confortables, tout en diminuant leur empreinte carbone. [1]

Ainsi, ce projet s'inscrit dans une démarche innovante, répondant aux défis contemporains liés à la gestion durable des ressources et à l'amélioration de la qualité de vie au sein des espaces résidentiels.

## **Chapitre 2 : Généralités sur l'Internet des Objets et l'Intelligence Artificielle**

### **Introduction**

L'Internet des Objets et l'Intelligence Artificielle sont deux technologies innovantes qui révolutionnent de nombreux secteurs, notamment celui des bâtiments intelligents.

L'Internet des Objets (IoT), qui consiste à connecter des dispositifs physiques à Internet pour collecter, échanger et analyser des données en temps réel, joue un rôle essentiel dans l'automatisation et la gestion efficace des systèmes domestiques et industriels [14]. Parallèlement, l'IA permet de traiter ces données massives en fournissant des réponses intelligentes et adaptées aux besoins spécifiques des utilisateurs grâce à des techniques telles que l'apprentissage automatique, le traitement du langage naturel et les systèmes experts [15].

L'intégration de l'IA et de l'Internet des Objets, souvent désignée par le terme « AIoT » (Artificial Intelligence of Things), permet une optimisation des processus, une prise de décision autonome et une amélioration significative de la sécurité, du confort et de l'efficacité énergétique au sein des bâtiments intelligents [16].

Ce chapitre se propose de présenter les concepts fondamentaux de l'Internet des Objets et de l'Intelligence Artificielle, en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, leurs applications dans les systèmes intelligents ainsi que les technologies et protocoles utilisés pour leur implémentation.

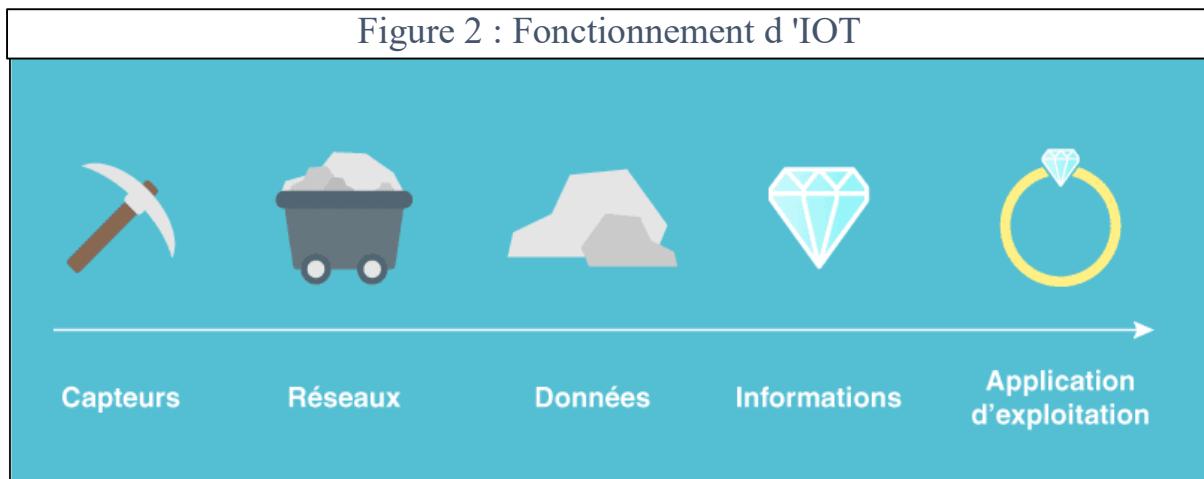
### **1. Internet des Objets (IoT)**

#### **1.1. Définition**

L'Internet des Objets (IoT) désigne un réseau d'objets physiques interconnectés via Internet, capables de collecter, d'échanger et d'analyser des données en temps réel grâce à des capteurs, des logiciels et d'autres technologies intégrées. [17] Cette interconnexion permet aux objets de communiquer entre eux et avec des systèmes centraux, facilitant ainsi l'automatisation et le contrôle à distance de divers processus.

## 1.2. Fonctionnement de l'IoT

Le fonctionnement de l'IoT repose sur l'intégration de systèmes informatiques à une variété d'objets physiques, leur permettant de recevoir et de transmettre des données sur des réseaux sans fil avec une intervention humaine minimale. [18] Cette technologie permet aux objets de capturer des informations précieuses, qui sont ensuite analysées et utilisées pour automatiser des tâches ou fournir des insights. [17]



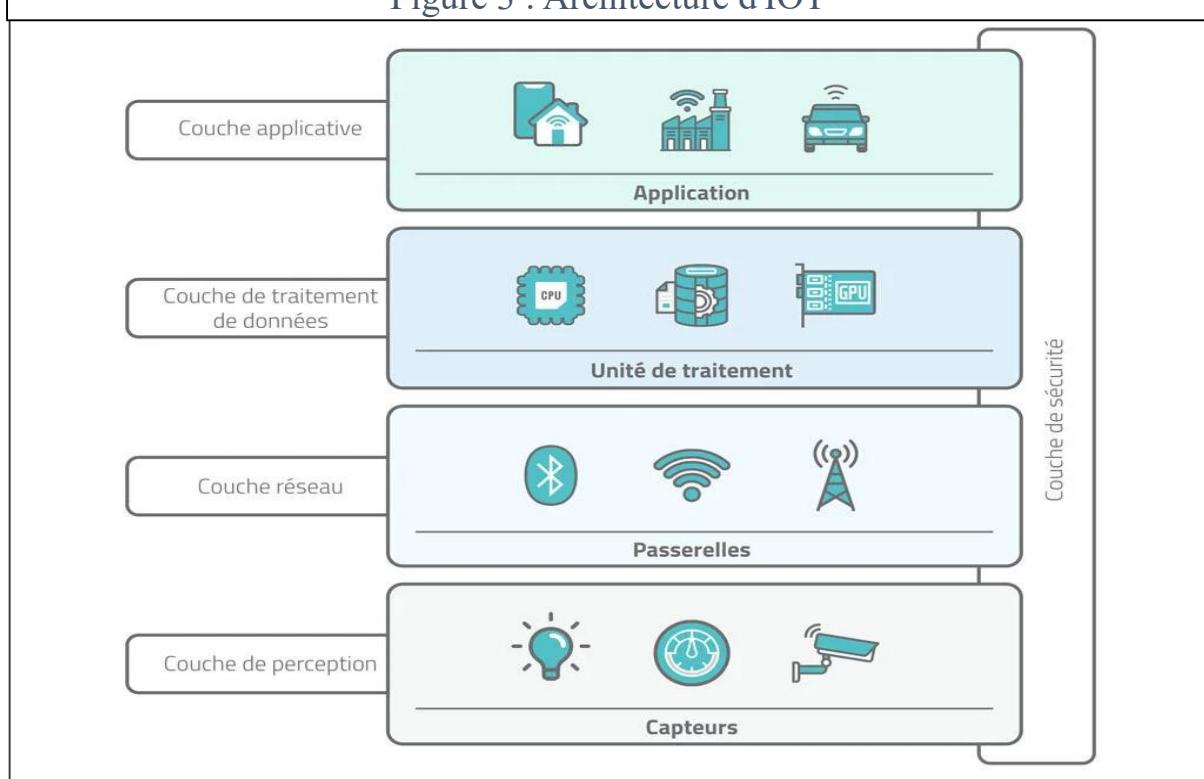
Src: <https://www.digora.com/fr/blog/quest-ce-que-liot-et-pourquoi-mener-une-strategie-diot>

## 1.3. Architecture de l'IoT

L'architecture d'un système IoT comprend généralement quatre composantes clés : [19] *Appareils IoT* (Objets physiques équipés de capteurs ou d'actionneurs capables de collecter des données ou d'effectuer des actions spécifiques.) [20] , *Connectivité* (Moyens de communication (tels que Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee) permettant aux appareils IoT de transmettre les données collectées à d'autres systèmes.) *Plateforme IoT* (Infrastructure qui reçoit, stocke et traite les données transmises par les appareils IoT, souvent hébergée dans le cloud.) [19] et *Couche applicative* (Interface utilisateur ou système qui interprète les données traitées et permet aux utilisateurs finaux d'interagir avec le système IoT.). [19]

Les données circulent des capteurs fixés sur des objets, à travers un réseau, vers un centre de données d'entreprise ou le cloud pour le traitement, l'analyse et le stockage. [21]

Figure 3 : Architecture d'IOT



Src: <https://iotindustriel.com/iot-iiot/architecture-iot-lessentiel-a-savoir/>

#### 1.4. Importance et applications dans les bâtiments intelligents

L'intégration de l'IoT dans les bâtiments intelligents transforme les structures traditionnelles en environnements adaptatifs et réactifs. [22]

En connectant des dispositifs intelligents tels que des capteurs et des compteurs, l'IoT automatise divers systèmes, notamment la plomberie, l'électricité et le chauffage, ventilation et climatisation (CVC), réduisant ainsi le travail manuel et améliorant l'efficacité opérationnelle. [23]

De plus, l'IoT facilite la gestion de l'énergie, la surveillance de la sécurité et l'amélioration du confort des occupants, contribuant ainsi à des bâtiments plus durables et économies en ressources.

## 2. Intelligence Artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine de l'informatique qui vise à créer des systèmes capables de reproduire des fonctions cognitives humaines telles que l'apprentissage, le raisonnement et la perception. Ces systèmes utilisent des algorithmes avancés et des modèles

mathématiques pour traiter des données complexes et accomplir des tâches traditionnellement réservées aux humains. Par exemple, dans le secteur de la construction, l'IA est utilisée pour automatiser des tâches répétitives, analyser de grandes quantités de données et optimiser la planification et la gestion des projets, ce qui conduit à une réduction des coûts et des délais, ainsi qu'à une amélioration de la qualité et de la sécurité des ouvrages. [24]

Dans le cadre de notre projet de bâtiment intelligent, l'IA est intégrée sous la forme d'un chatbot intelligent destiné au syndicat de l'immeuble. Ce chatbot multilingue, accessible via une interface web sécurisée, est conçu pour répondre aux questions des résidents en français, anglais et arabe. En utilisant des technologies telles que le traitement du langage naturel (NLP) et l'apprentissage automatique, le chatbot analyse les requêtes des utilisateurs et fournit des réponses précises et contextuelles, améliorant ainsi la communication et la gestion au sein de la communauté résidentielle. L'utilisation de chatbots dans la gestion des bâtiments permet d'automatiser les interactions entre les opérateurs, les systèmes et les données, facilitant ainsi une gestion plus efficace des installations.

Pour le développement de ce chatbot, nous avons employé des méthodes d'apprentissage automatique, notamment l'apprentissage supervisé, où le modèle est entraîné sur des ensembles de données annotées pour reconnaître des motifs et générer des réponses appropriées. Les données sont stockées et échangées au format JSON (JavaScript Object Notation), un format léger et facile à manipuler, largement utilisé pour la transmission de données entre un serveur et une application web. L'utilisation de JSON facilite l'organisation structurée des informations, permettant au chatbot de traiter efficacement les requêtes des utilisateurs et de fournir des réponses cohérentes. Cette approche est couramment utilisée dans le développement de chatbots pour le secteur immobilier, où les bots aident à planifier des visites, obtenir des informations sur les listes et postuler pour des offres, en intégrant les données des systèmes de gestion de projet. [25]

En résumé, l'intégration de l'IA dans notre projet, via le développement d'un chatbot intelligent, illustre comment les technologies modernes peuvent être utilisées pour améliorer la gestion et le confort des résidents dans un bâtiment intelligent. Cette utilisation de l'IA contribue à une gestion plus efficace des ressources, à une meilleure communication entre les résidents et le syndicat, et à une optimisation des opérations quotidiennes au sein de l'immeuble.

## **Conclusion**

En conclusion, l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) et de l'Intelligence Artificielle (IA) dans les bâtiments intelligents révolutionne la gestion et l'utilisation des infrastructures modernes.

L'IoT permet une collecte de données en temps réel grâce à des capteurs connectés, facilitant ainsi le suivi précis de divers paramètres au sein des bâtiments. [26] L'IA, quant à elle, analyse ces données pour optimiser la consommation d'énergie, améliorer le confort des occupants et renforcer la sécurité des installations.

Cette synergie entre l'IoT et l'IA conduit à des bâtiments plus réactifs et autonomes, capables d'apprendre des habitudes des occupants pour ajuster automatiquement les systèmes de chauffage, d'éclairage et autres équipements. [27]

En adoptant ces technologies, les bâtiments intelligents deviennent plus efficaces, durables et adaptés aux besoins contemporains.

## Chapitre 3 : Analyse et Conception de la Solution

### Introduction

L'analyse et la conception de solutions pour les bâtiments intelligents nécessitent une approche méthodique, combinant des principes d'ingénierie avancés et une compréhension approfondie des besoins des utilisateurs. Cette démarche vise à développer des systèmes intégrés qui optimisent la gestion de l'énergie, améliorent le confort des occupants et renforcent la sécurité.

Des études antérieures ont exploré diverses méthodes pour concevoir de tels systèmes, mettant en évidence l'importance de l'interopérabilité entre les dispositifs et la nécessité d'une interface utilisateur intuitive.

Par exemple, une étude détaillée sur la gestion énergétique dans les bâtiments intelligents souligne l'importance de développer des modèles et des méthodes innovantes pour optimiser la consommation d'énergie tout en assurant le confort des occupants. [28] Dans ce contexte, l'intégration de technologies telles que l'Internet des Objets et l'Intelligence Artificielle joue un rôle crucial pour atteindre ces objectifs.

#### 1. Analyse des besoins

L'analyse des besoins pour le projet "Bâtiment Intelligent avec Support IA et Systèmes IoT" se divise en deux catégories principales : les besoins fonctionnels et les besoins non fonctionnels.

Les besoins *fonctionnels* englobent les fonctionnalités essentielles que le système doit offrir. Premièrement, le contrôle des accès est primordial pour assurer que seules les personnes autorisées puissent entrer dans le bâtiment. L'intégration de systèmes de porte d'entrée avec des dispositifs de sécurité et des plateformes domotiques est essentielle pour créer une expérience cohérente et sécurisée. [29] Deuxièmement, la détection d'incidents est cruciale pour identifier rapidement les situations anormales, telles que les incendies ou les fuites de gaz, permettant ainsi une intervention immédiate. Enfin, la mise en place d'un chatbot offre une interface interactive pour les occupants, facilitant l'accès aux informations et améliorant l'expérience utilisateur.

Les besoins *non fonctionnels* concernent les qualités que le système doit posséder pour fonctionner efficacement. La sécurité est une priorité absolue, garantissant la protection des données et des systèmes contre les cybermenaces. L'accessibilité assure que le système est utilisable par tous les occupants, y compris ceux ayant des besoins spécifiques. Enfin, la performance est essentielle pour que le système réponde rapidement aux commandes et traite efficacement les informations, garantissant ainsi une expérience utilisateur optimale. Ces besoins non fonctionnels sont des indicateurs de qualité de l'exécution des besoins fonctionnels. [30]

En répondant de manière exhaustive à ces besoins fonctionnels et non fonctionnels, le projet vise à développer un bâtiment intelligent qui est non seulement fonctionnel mais aussi sécurisé, accessible et performant, répondant ainsi aux attentes des utilisateurs et aux normes actuelles en matière de bâtiments intelligents.

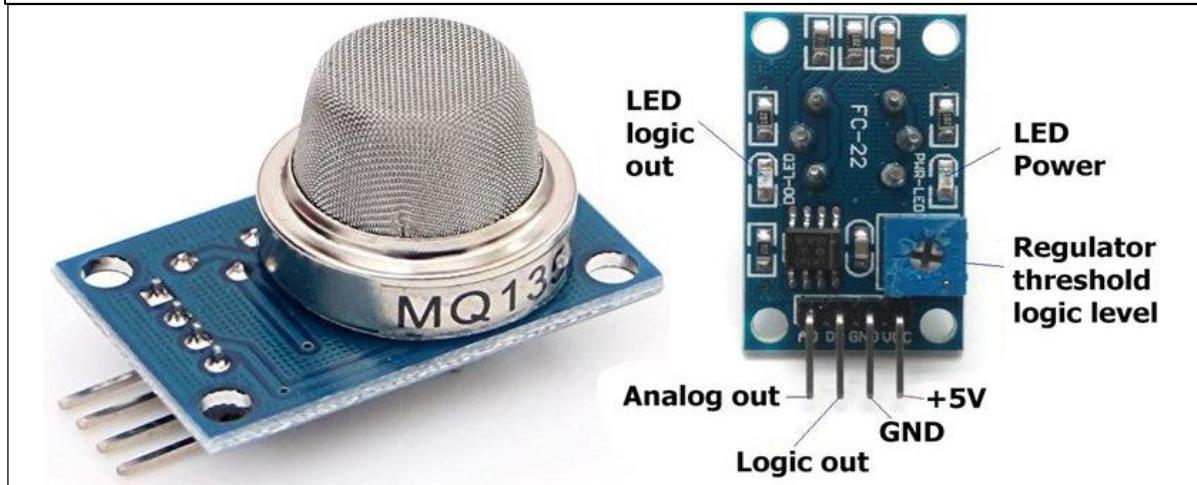
## 2. Choix des outils et technologies

Dans le cadre de la réalisation de notre projet nous avons utilisé plusieurs outils ;

Les capteurs sélectionnés permettent une surveillance environnementale complète, couvrant la qualité de l'air, les conditions météorologiques, la sécurité et l'agriculture intelligente.

**MQ135** : Ce capteur est conçu pour détecter une variété de gaz nocifs, notamment l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), le monoxyde de carbone (CO), le benzène ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), ainsi que la fumée et d'autres polluants atmosphériques. Il est couramment utilisé pour surveiller la qualité de l'air intérieur et prévenir les risques liés à la pollution.

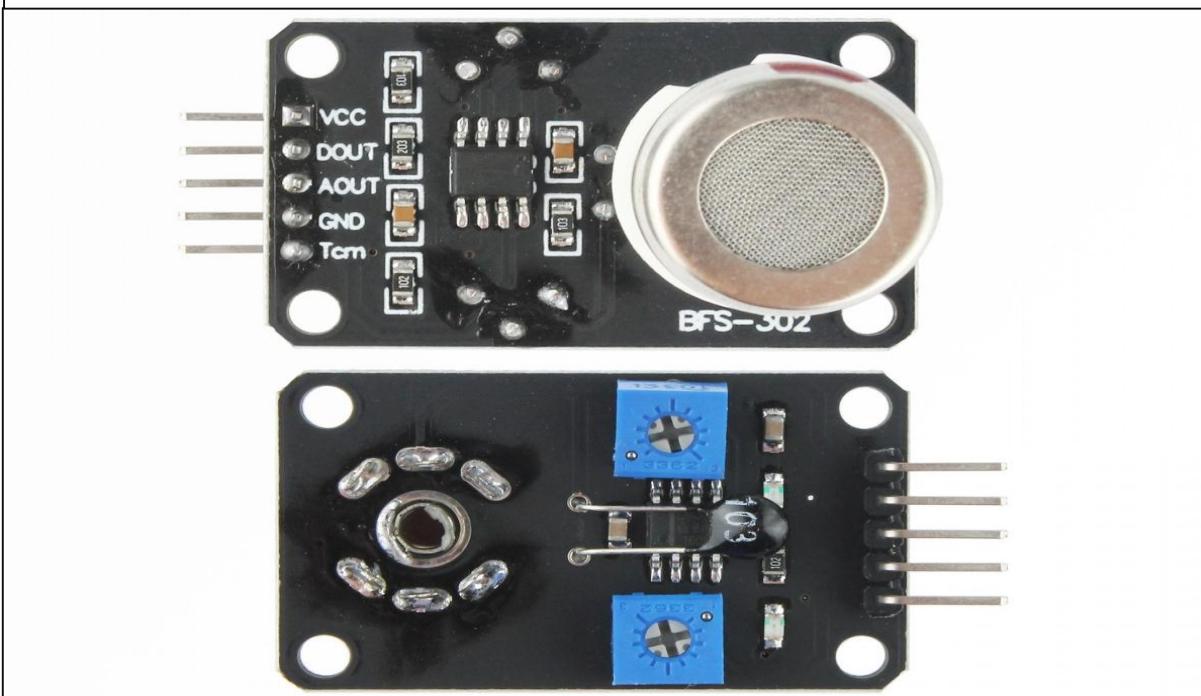
Figure 4 : Capteur MQ135



Src: <https://vishaworld.com/products/mq135-air-quality-control-gas-sensor-module>

**MG811** : Spécialisé dans la mesure de la concentration de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le capteur MG811 est essentiel pour évaluer la qualité de l'air et assurer une ventilation adéquate dans les espaces clos.

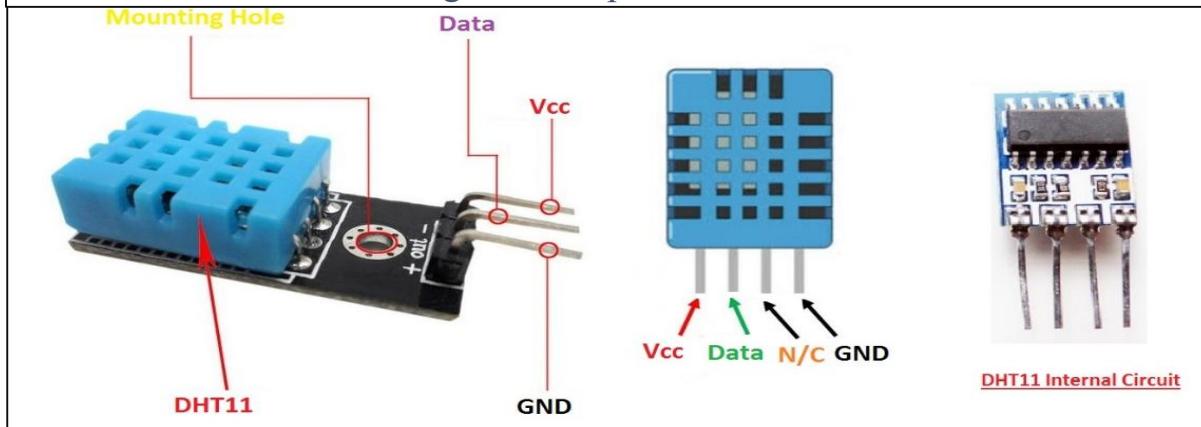
Figure 5: Capteur MG811



Src: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-gas-arduino/sensor-mg811-detector-de-dioxido-de-carbono-co2-5981.html>

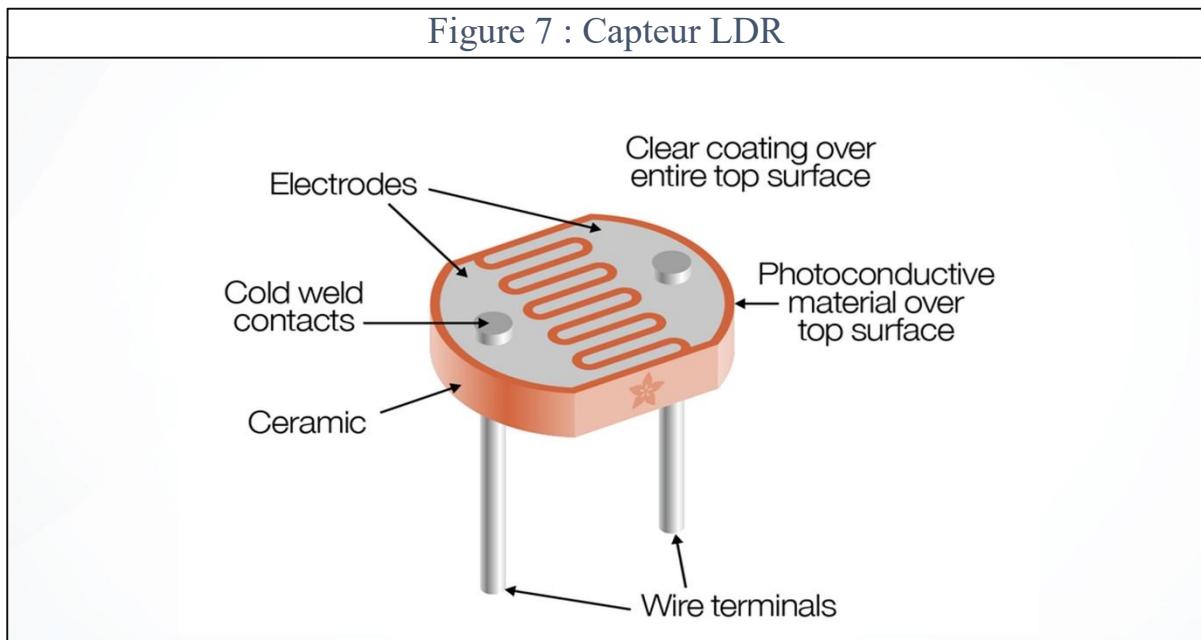
**DHT11** : Ce capteur combine la mesure de la température et de l'humidité relative, offrant des données précises pour le contrôle climatique des environnements intérieurs. Il est largement utilisé dans les systèmes de surveillance environnementale.

Figure 6 : Capteur DHT11



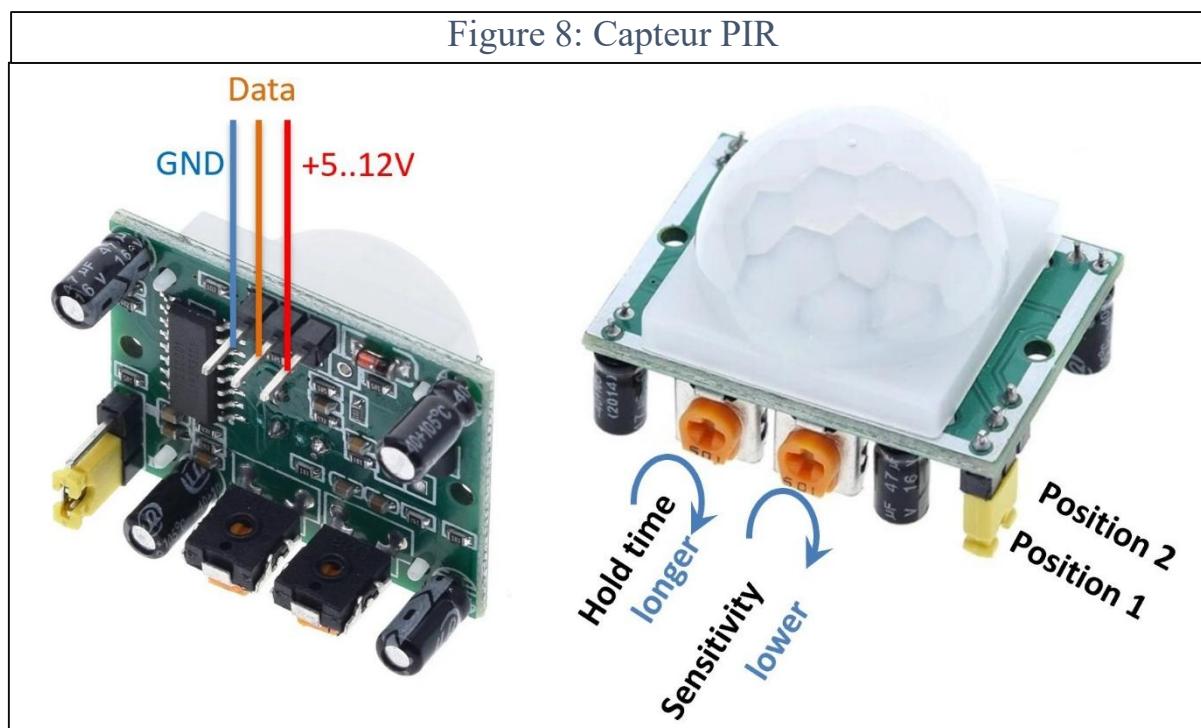
Src: <https://www.theengineeringprojects.com/2019/03/introduction-to-dht11.html>

**LDR:** Utilisé pour détecter l'intensité lumineuse ambiante, le capteur LDR permet d'ajuster automatiquement l'éclairage en fonction de la luminosité naturelle, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique.



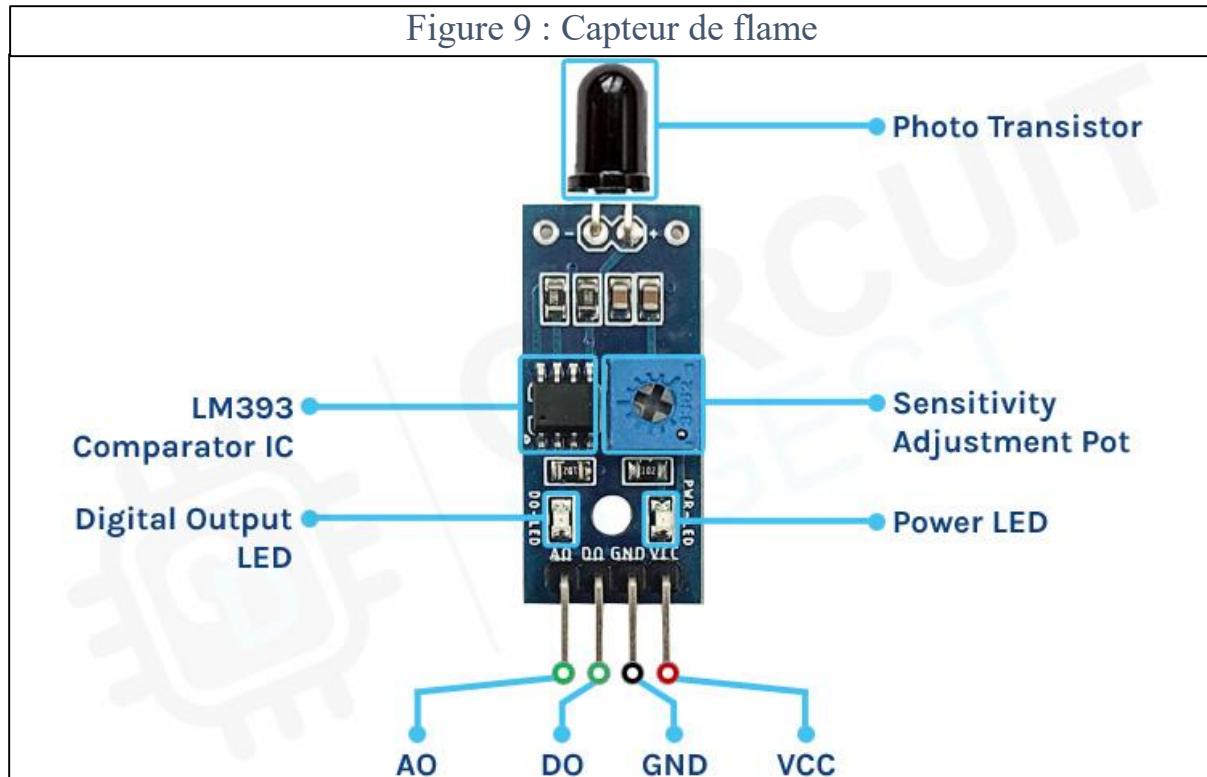
Src: <https://www.theengineeringprojects.com/2023/01/interfacing-a-light-sensor-ldr-with-raspberry-pi-4.html>

**Capteur PIR:** Ce capteur détecte les mouvements en captant les variations de rayonnement infrarouge, ce qui le rend idéal pour les systèmes de sécurité et l'automatisation de l'éclairage.



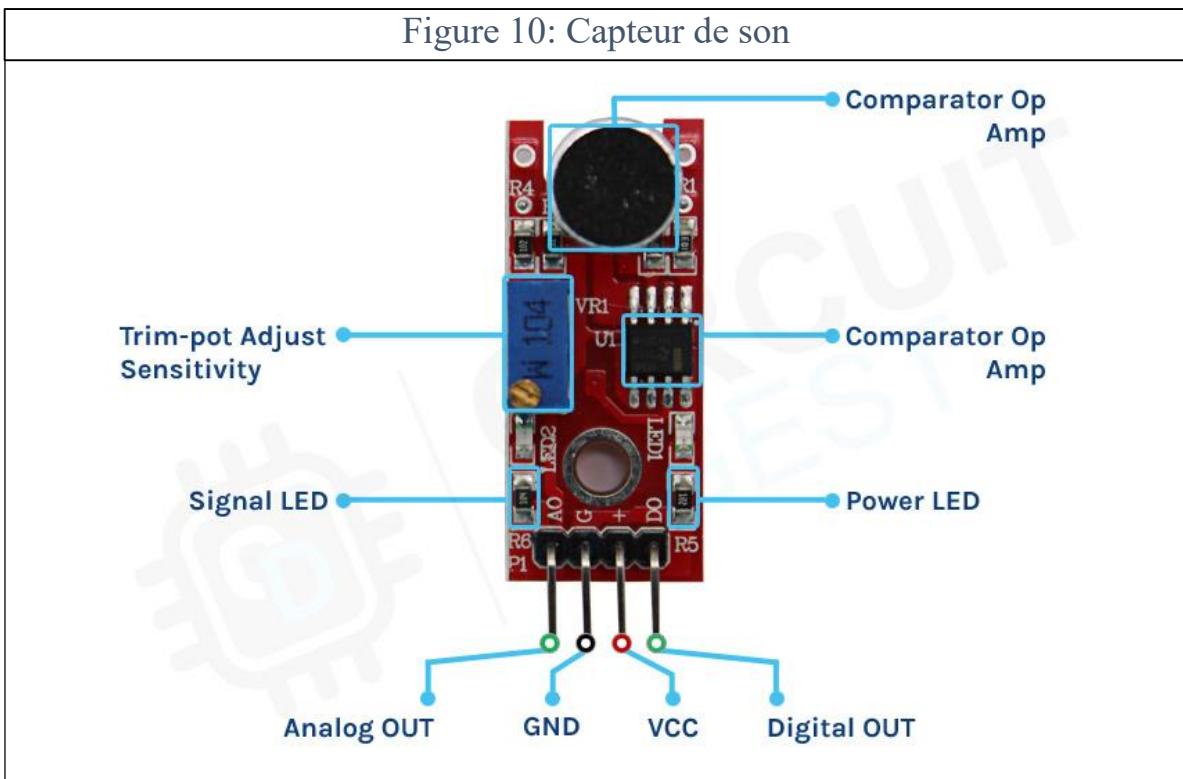
Src: <https://kno.wled.ge/advanced/pir-sensors/>

**Capteur de flamme :** Conçu pour détecter la présence de flammes, ce capteur est crucial pour la détection précoce d'incendies, améliorant ainsi la sécurité des occupants.



Src: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-flame-sensor-with-arduino>

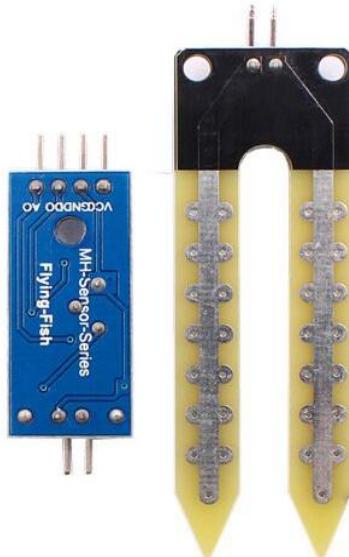
**Capteur de son :** Ce dispositif mesure les niveaux sonores environnents, permettant la détection d'anomalies acoustiques ou la surveillance du bruit ambiant dans un bâtiment intelligent.



Src: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-sound-sensor-with-arduino>

**Capteur d'humidité du sol** : Essentiel pour les systèmes d'irrigation automatisés, ce capteur mesure l'humidité du sol, optimisant ainsi l'arrosage des espaces verts et contribuant à la gestion durable de l'eau.

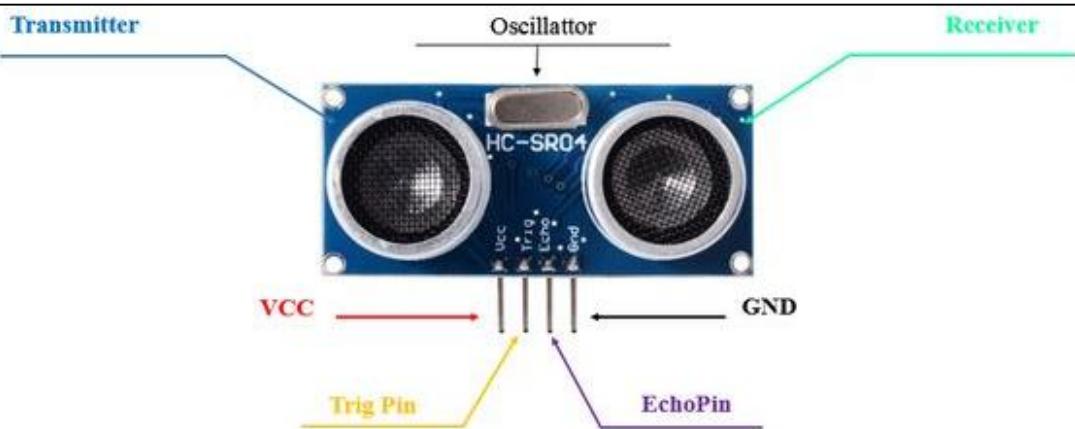
Figure 11 : Capteur d'humidité du sol



Src: <https://www.makerfabs.com/soil-moisture-sensor-module.html>

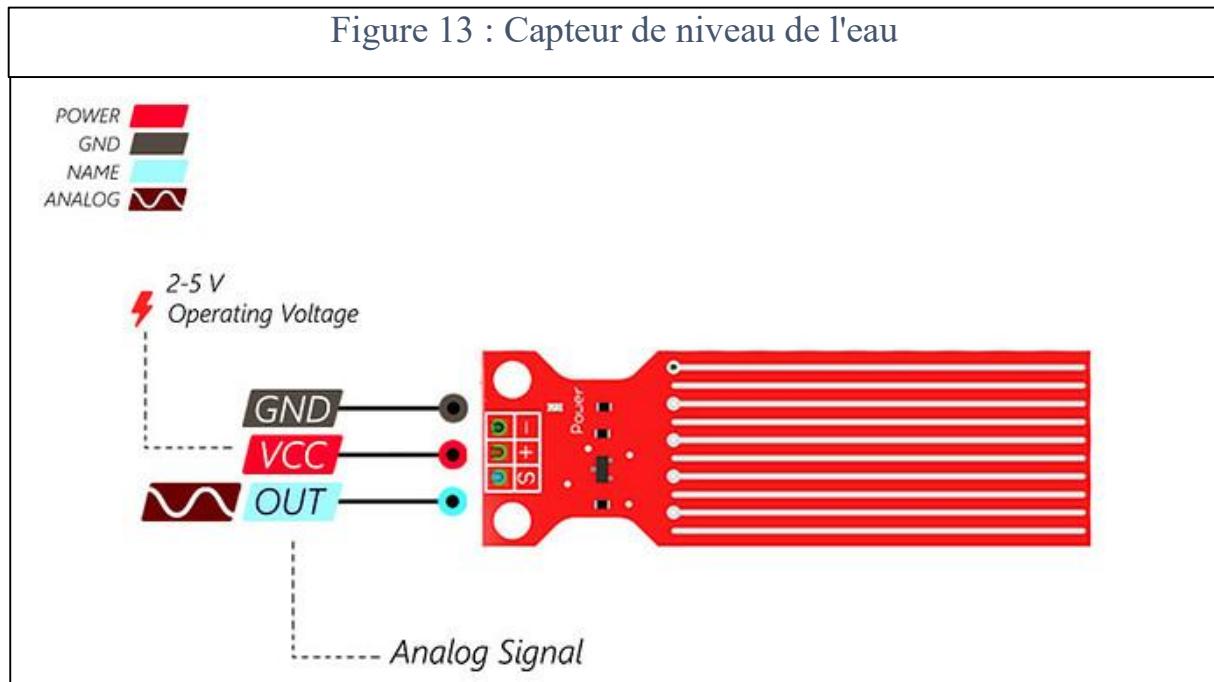
**HC-SR04** : Ce capteur à ultrasons mesure la distance en émettant des ondes sonores et en calculant le temps de retour de l'écho. Il est couramment utilisé pour la détection d'obstacles ou la mesure de niveaux dans divers contextes.

Figure 12 : Capteur ultrason



Src: <https://www.the-diy-life.com/connecting-an-ultrasonic-sensor-to-an-arduino/>

**Capteur de niveau d'eau :** Utilisé pour surveiller le niveau des liquides dans les réservoirs, ce capteur aide à prévenir les débordements ou les pénuries, assurant ainsi une gestion efficace des ressources en eau.



Src: <https://forum.arduino.cc/t/lcd-water-senser/1132088>

Au temps qu'on a utilisé les actionneurs suivants :

**LEDs :** Les diodes électroluminescentes sont utilisées pour l'éclairage et les indications visuelles, offrant une faible consommation d'énergie et une longue durée de vie.

**Buzzer :** Cet actionneur émet des signaux sonores pour les alertes ou les notifications, améliorant ainsi l'interaction utilisateur dans le système.

**Pompe :** Utilisée pour contrôler le flux de liquides, notamment dans les systèmes d'irrigation automatisés, la pompe assure une distribution efficace de l'eau.

**LCD I2C :** Ce module d'affichage permet de présenter des informations textuelles, facilitant l'interaction et la surveillance des données système par les utilisateurs.

**RFID :** La technologie d'identification par radiofréquence est employée pour le contrôle d'accès sécurisé, permettant l'identification sans contact des individus autorisés.

**Servo moteur :** Cet actionneur permet des mouvements précis, tels que l'ouverture et la fermeture de portes ou l'orientation de dispositifs, contribuant à l'automatisation des infrastructures.

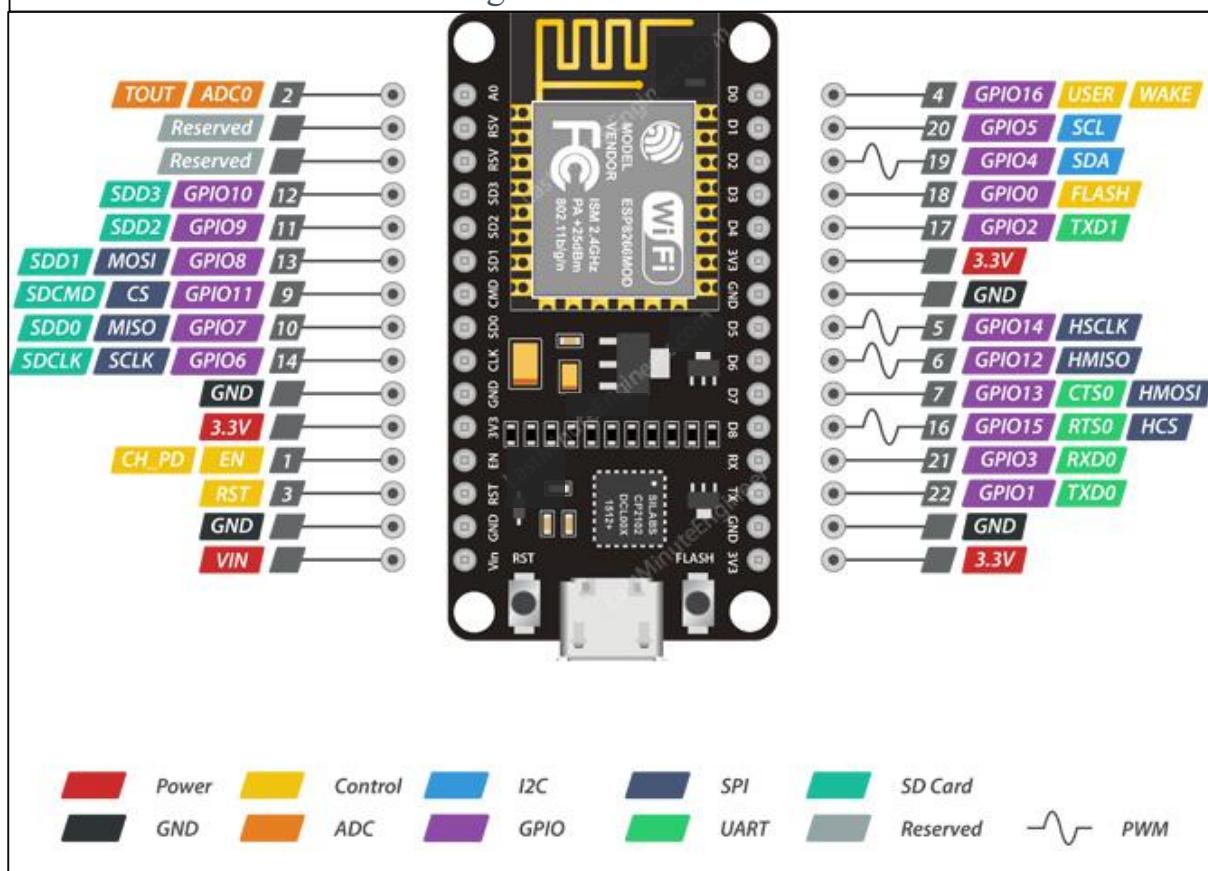
Src: <https://forum.arduino.cc/t/lcd-water-senser/1132088>

**Boutons** : Les boutons physiques offrent une interface utilisateur simple pour déclencher diverses fonctions au sein du système, améliorant l'interactivité.

Alors que les microcontrôleurs :

**ESP8266** : Ce microcontrôleur intègre une connectivité Wi-Fi, le rendant idéal pour les applications IoT nécessitant une communication sans fil. Il est reconnu pour sa faible consommation d'énergie et son coût abordable.

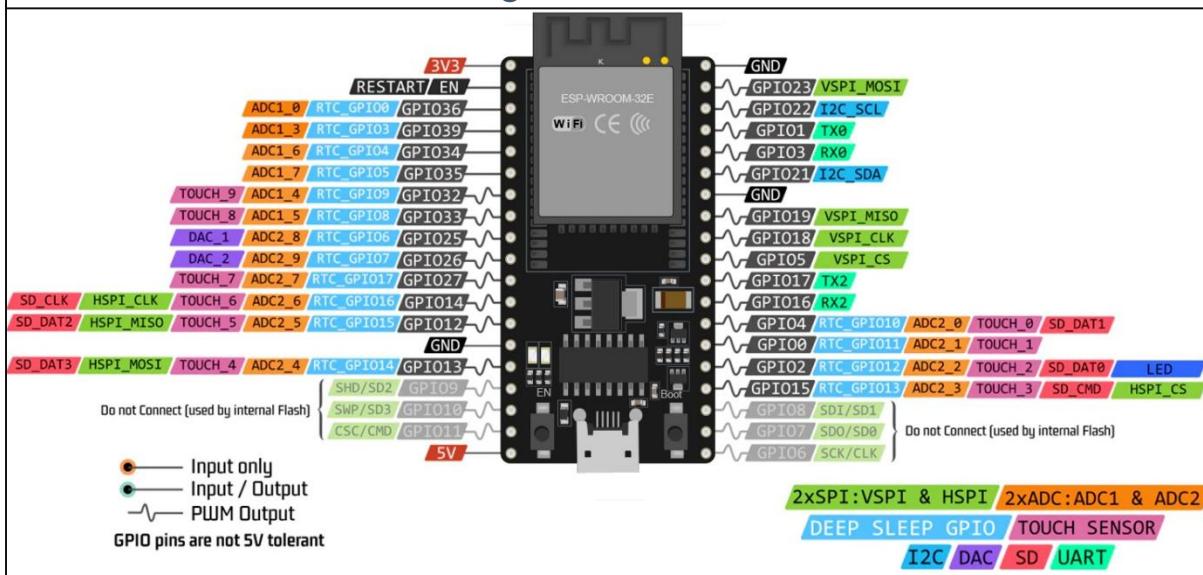
Figure 14 : ESP8266



Src: <https://www.analogread.com/article/90>

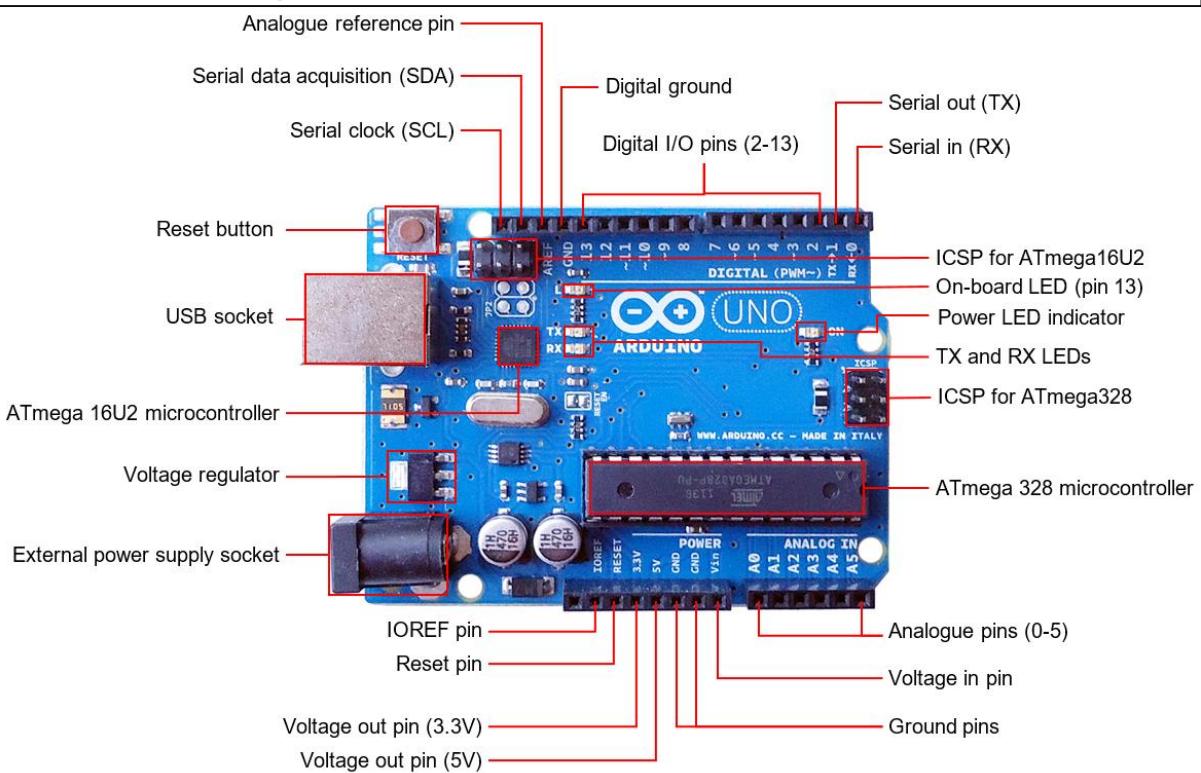
**ESP32** : Plus puissant que l'ESP8266, l'ESP32 offre une double connectivité Wi-Fi et Bluetooth, ainsi que des capacités de traitement améliorées, le rendant adapté aux applications IoT avancées.

Figure 15 : ESP32

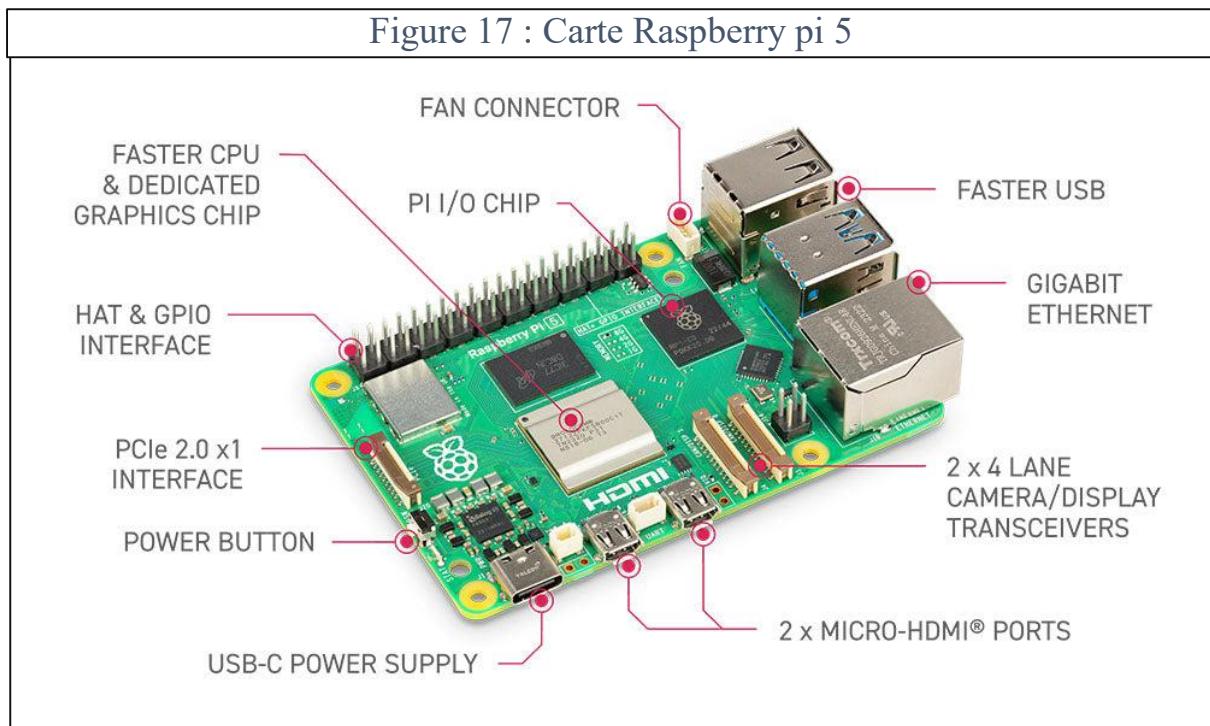


Arduino Uno Rev3 : Plateforme microcontrôleur polyvalente, l'Arduino Uno est largement utilisé pour le prototypage rapide et le contrôle de divers capteurs et actionneurs.

Figure 16: Microcontrôleur Arduino UNO Rev3



**Raspberry Pi 5 :** Ordinateur monocarte performant, le Raspberry Pi 5 est utilisé pour des tâches complexes nécessitant une puissance de calcul supérieure, telles que le traitement d'images ou l'hébergement de serveurs.



Src: <https://kitronik.co.uk/blogs/resources/the-differences-between-raspberry-pi-4-model-b-raspberry-pi-5>

Ainsi les protocoles suivants :

**MQTT:** Protocole léger de messagerie publié/abonné, MQTT est optimisé pour les connexions à faible bande passante et les dispositifs contraints, le rendant largement utilisé dans les applications IoT.

**HTTP:** Protocole standard pour la communication web, HTTP est utilisé pour les interfaces utilisateur et les API, facilitant l'interaction entre les systèmes.

**I2C:** Bus de communication série permettant la connexion de multiples périphériques avec un minimum

Finalement, nous avons utilisé les plateformes suivantes :

**Visual Studio Code & Arduino IDE :** Environnements de programmation pour le codage et le débogage.

### 3. Architecture globale du système

L'architecture globale du système de bâtiment intelligent repose sur une approche modulaire, organisée en plusieurs couches logiques pour assurer une séparation claire des responsabilités, améliorant ainsi la maintenabilité, la scalabilité et l'intégration de nouveaux composants. Cette architecture comprend les couches suivantes :

Couche physique (Hardware) : Cette couche englobe tous les dispositifs matériels utilisés pour collecter des données et exécuter des actions. Les capteurs tels que le MQ135 pour la détection de gaz, le DHT11 pour la mesure de la température et de l'humidité, et le capteur PIR pour la détection de mouvement, sont connectés à des microcontrôleurs comme l'ESP8266, l'ESP32 et l'Arduino Uno Rev3 pour traiter les informations en temps réel. Les actionneurs, notamment les LED, les buzzers et les servomoteurs, réagissent aux données collectées pour automatiser diverses fonctions du bâtiment. [31]

Couche réseau (Communication) : Cette couche gère la transmission des données entre les composants matériels et l'application web. Les protocoles de communication utilisés incluent : **I2C** : Utilisé pour la communication entre les capteurs et les microcontrôleurs, permettant le transfert de données sur de courtes distances avec une consommation minimale de broches ; **Wi-Fi** : Employé par les microcontrôleurs ESP8266 et ESP32 pour se connecter au réseau local, facilitant la communication sans fil avec le serveur central ; [32] **MQTT** : Un protocole léger de messagerie basé sur le modèle publication/abonnement, idéal pour les applications IoT en raison de sa faible consommation de bande passante et de sa fiabilité .

Couche de traitement (Middleware) : Cette couche est responsable du traitement et du stockage des données collectées. Un serveur central, tel qu'un Raspberry Pi 5, héberge des applications développées en Python utilisant des bibliothèques telles que Flask pour la gestion des requêtes HTTP, SQLite3 pour la gestion de bases de données légères, et Mosquitto pour la communication MQTT. Ces outils permettent de traiter les données en temps réel, de déclencher des alertes en cas d'anomalies et de stocker les informations pour une analyse ultérieure.

Couche applicative (Software) : Cette couche fournit une interface utilisateur intuitive accessible via une application web. Développée avec des plateformes telles que Visual Studio Code et Arduino IDE, l'application web comprend plusieurs pages : **Home** : Présentation générale du bâtiment intelligent et de ses fonctionnalités ; **Guide** : Instructions détaillées sur l'utilisation du système et des dispositifs connectés ; **Gallery** : Visualisation des différentes

pièces et équipements du bâtiment ; **Feedback** : Section permettant aux utilisateurs de soumettre des commentaires et des suggestions ; **Syndicate** : Intégration d'un chatbot multilingue (français, anglais, arabe) pour assister les résidents dans leurs interactions avec le système.

En adoptant cette architecture modulaire, le système de bâtiment intelligent assure une gestion efficace des ressources, une communication fiable entre les composants et une expérience utilisateur optimisée, tout en facilitant l'évolution et l'intégration de nouvelles technologies à l'avenir.

#### 4. Modélisation avec SysML

La modélisation SysML (Systems Modeling Language) est essentielle pour concevoir et documenter des systèmes complexes, tels que les bâtiments intelligents. Dans le cadre de notre projet, nous avons élaboré plusieurs types de diagrammes SysML pour représenter différents aspects du système. Voici une explication détaillée de chacun de ces diagrammes : [33]

- Diagramme d'exigences :

Un diagramme d'exigences visualise les exigences d'un système, les relations entre les exigences et les relations avec d'autres éléments. Il est issu du langage de modélisation du système (SysML) de l'Object Management Group (OMG). Comparé à une représentation purement textuelle des exigences, il favorise la compréhension des interrelations. Autrement dit, le diagramme d'exigences fournit un aperçu visuel des exigences et assure une meilleure traçabilité dans le développement. [34]

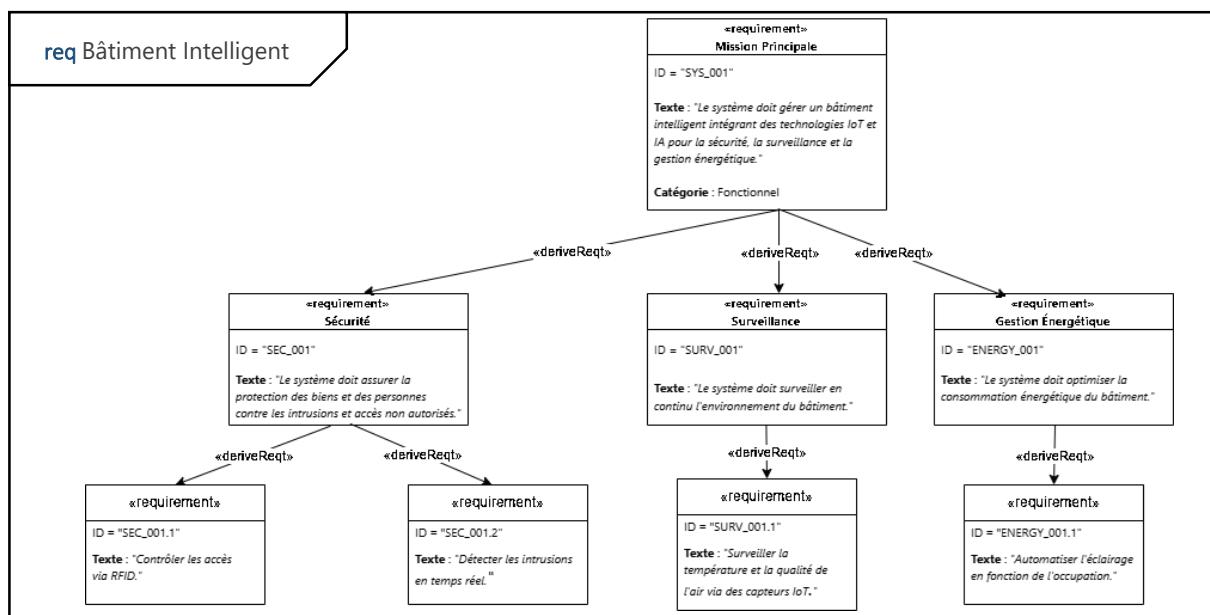


Figure 18 : Diagramme d'Exigences SysML pour le Bâtiment

- Diagramme de cas d'utilisation :

Diagramme de cas d'utilisation est un diagramme qui permet de déterminer les frontières du système et de le placer dans son contexte. Les cas d'utilisation représentent les services ou les fonctionnalités rendues par le système du point de vue de l'acteur, donc d'un point de vue extérieur. [35]

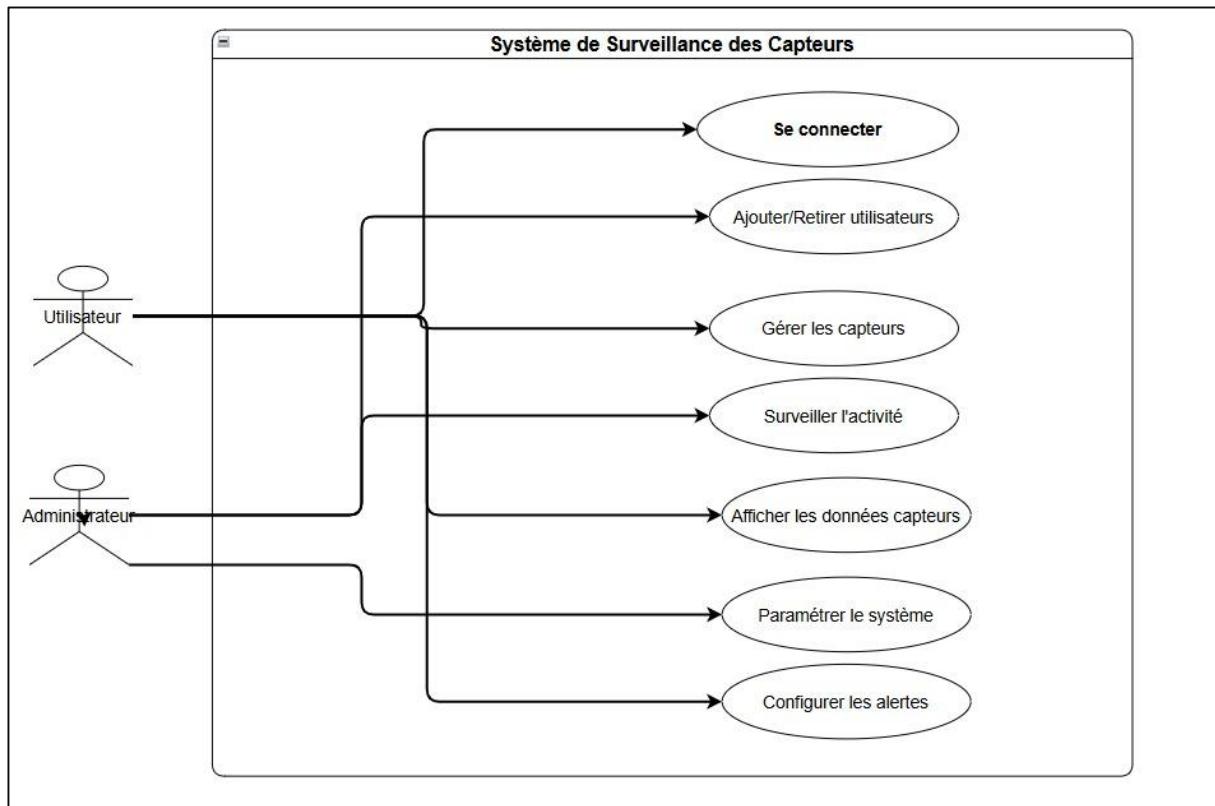


Figure 19 :Diagramme de cas d'utilisation

- Diagramme de séquence :

Un diagramme de Séquence , comme pour un diagramme de Séquence UML , est utilisé pour afficher l'interaction entre les utilisateurs, les écrans, les objets et les entités au sein du système. Il fournit une carte séquentielle des messages passant entre les objets au fil du temps. Souvent, ces diagrammes sont placés sous Cas d'utilisation dans le modèle pour illustrer le scénario de cas d'utilisation - comment un utilisateur interagira avec le système et ce qui se passe en interne pour faire le travail. [36]

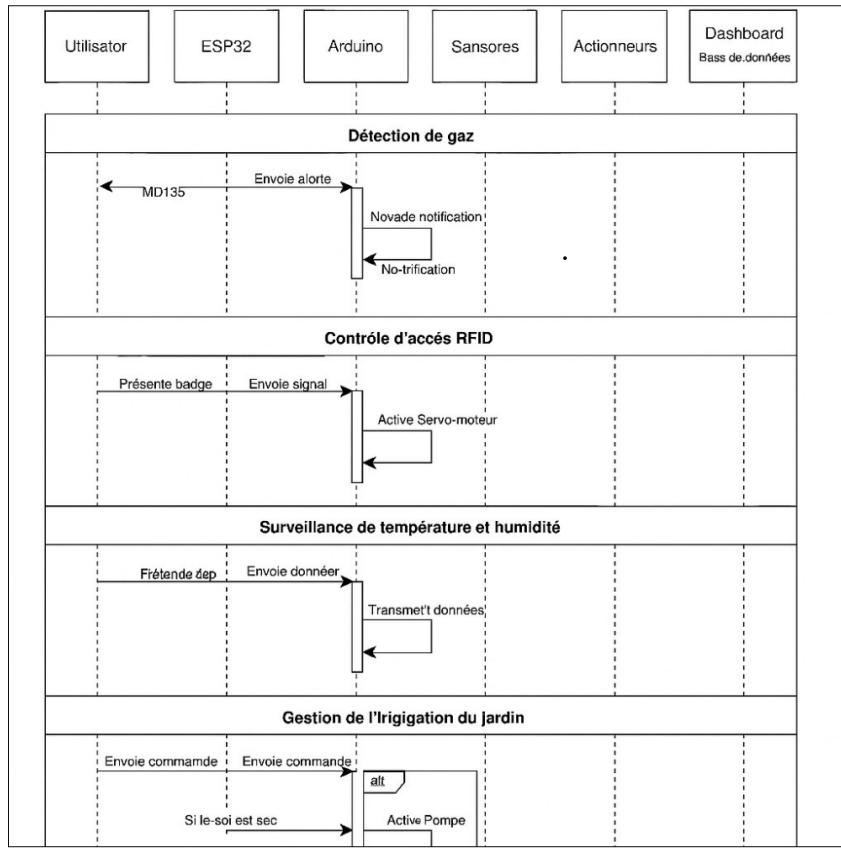


Figure 20: Diagramme de séquence

▪ Diagramme de bloc interne :

Le diagramme de bloc interne modélise la structure interne d'un bloc. Il décrit les flux (MEI) et interactions entre des blocs qui caractérisent les fonctions. Un diagramme de bloc interne est obligatoirement un descendant d'un diagramme de bloc. On reconnaît le diagramme de bloc interne par les trois lettres **ibd** qui surplombent le diagramme. [37]

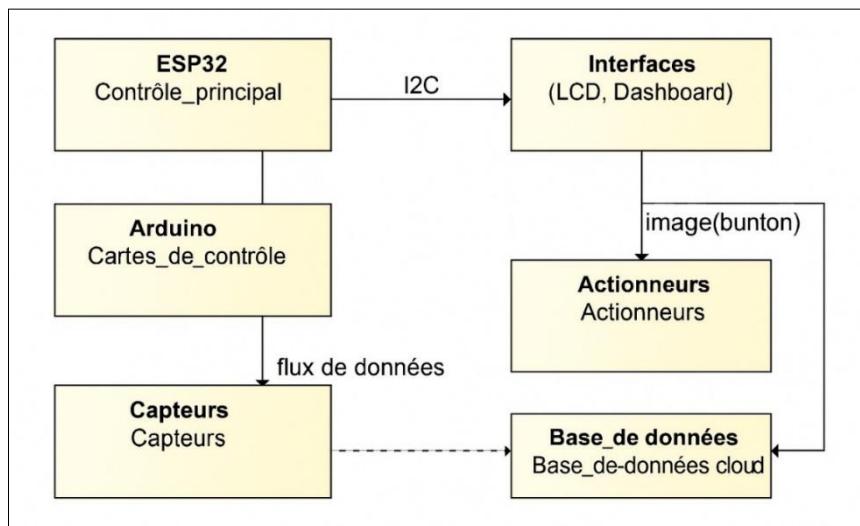


Figure 21: Diagramme de bloc interne

## **Conclusion**

L'analyse et la conception d'un bâtiment intelligent nécessitent une approche méthodique pour assurer la cohérence, la robustesse et l'évolutivité du système.

Ce chapitre a détaillé une architecture modulaire, segmentée en couches distinctes physique, communication, traitement et application afin de clarifier les responsabilités et de faciliter l'intégration de nouveaux composants.

L'utilisation de microcontrôleurs tels que l'ESP32 et l'ESP8266, reconnus pour leur compatibilité avec l'environnement Arduino et leur capacité à gérer des capteurs variés, permet une surveillance efficace de l'environnement bâti et une interaction intelligente avec les résidents.

La modélisation SysML a structuré la conception en formalisant les exigences, les interactions utilisateur-système et les flux de communication entre les composants, assurant ainsi une traçabilité rigoureuse des fonctionnalités.

L'application web offre une interface intuitive, permettant aux résidents de surveiller et de contrôler leur environnement en temps réel.

L'intégration de protocoles sécurisés, tels que HTTPS et MQTT, renforce la fiabilité et la confidentialité des échanges de données. Cette analyse approfondie établit une base solide pour l'implémentation et l'évaluation expérimentale du système, qui seront abordées dans les chapitres suivants.

## Chapitre 4 : Réalisation, Tests et Validation

### Introduction

L'implémentation d'un système embarqué intelligent repose sur une phase rigoureuse de développement et de validation, garantissant son bon fonctionnement dans un environnement réel. Ce chapitre décrit en détail le processus de mise en œuvre des composants matériels et logiciels du bâtiment intelligent, en intégrant des microcontrôleurs comme l'ESP32, l'ESP8266 et l'Arduino, ainsi que divers capteurs pour la collecte des données environnementales et la gestion des interactions avec les résidents [38]. L'implémentation suit une approche itérative, permettant d'optimiser les performances du système grâce à des ajustements progressifs basés sur des tests expérimentaux [39].

Par ailleurs, les protocoles de communication tels que MQTT et HTTP sont mis en place afin d'assurer un échange sécurisé et fiable des données entre les microcontrôleurs et l'application web, garantissant une interconnectivité fluide entre les différentes couches du système [40]. L'application web, développée avec des technologies modernes comme HTML, CSS, JavaScript et Bootstrap, permet une gestion centralisée des équipements et une visualisation en temps réel des informations collectées.

Enfin, la phase de test joue un rôle crucial dans la validation du système, en identifiant d'éventuelles anomalies et en optimisant les performances des composants matériels et logiciels. Des méthodes de tests unitaires, fonctionnels et de stress sont mises en place pour évaluer la fiabilité et la réactivité du système dans différents scénarios d'usage [41]. Cette étape assure ainsi la robustesse et l'efficacité du bâtiment intelligent avant son déploiement final.

### 1. Implémentation

L'implémentation du bâtiment intelligent repose sur une configuration rigoureuse des microcontrôleurs, un développement backend robuste et une interface frontend intuitive, garantissant une interaction fluide entre les composants du système.

Les microcontrôleurs utilisés, à savoir l'Arduino, l'ESP32 et l'ESP8266, sont configurés pour collecter, traiter et transmettre les données en temps réel. L'Arduino est programmé via l'environnement de développement Arduino IDE pour la gestion des capteurs et des protocoles

de communication [42]. L'ESP32 et l'ESP8266, quant à eux, sont configurés aussi avec le framework Arduino IDE, permettant une connectivité Wi-Fi et MQTT avancée [43]. Ces microcontrôleurs communiquent via les protocoles I2C, SPI et UART pour assurer l'échange de données avec les capteurs et actionneurs du bâtiment [44].

Au temps que pour l'application web, le backend du système est conçu pour traiter et stocker les données issues des capteurs en temps réel. Python est utilisé pour la mise en place du serveur central, en s'appuyant sur le Framework Flask pour gérer les requêtes HTTP et sur *Mosquitto* pour l'abonnement et la publication des messages via MQTT [45]. Les données collectées sont stockées dans une base de données SQLite3, optimisée pour garantir un accès rapide et structuré aux informations du bâtiment. Par ailleurs, des fichiers JSON et CSV sont générés pour assurer une compatibilité avec d'autres systèmes d'analyse et de visualisation, facilitant l'exportation et l'exploitation des données en temps réel [46]. L'interface utilisateur du bâtiment intelligent est développée en utilisant des technologies web modernes, assurant une expérience fluide et intuitive. HTML est employé pour structurer les différentes pages (Home, Guide, Gallery, Feedback, Syndicate), tandis que CSS et Bootstrap garantissent un design responsive et esthétique [47]. JavaScript et jQuery sont intégrés pour dynamiser l'interface et permettre l'interaction avec le backend via AJAX, assurant une mise à jour en temps réel des informations sans nécessiter de recharge complet de la page [48]. Cette architecture frontend-backend favorise une gestion efficace des équipements et une visualisation des données en temps réel, garantissant ainsi un contrôle optimal du bâtiment intelligent.

## 2. Tests et validation

Les tests et la validation du système sont des étapes cruciales garantissant son bon fonctionnement, sa robustesse et sa conformité aux exigences initiales. La méthodologie de test adoptée repose sur une approche systématique comprenant des tests unitaires, des tests d'intégration et des tests de validation fonctionnelle.

Les tests unitaires ont été réalisés sur chaque module, notamment les capteurs, les microcontrôleurs et les modules de communication, afin de vérifier leur bon fonctionnement de manière isolée. Des outils tels que Arduino Serial Monitor ont été utilisés pour observer et analyser les réponses des microcontrôleurs en fonction des stimuli d'entrée.

Les tests d'intégration ont ensuite permis d'évaluer la communication entre les différents composants du système, notamment la transmission des données entre les capteurs, le serveur backend et l'interface utilisateur.

Enfin, des tests de validation fonctionnelle ont été effectués en conditions réelles pour s'assurer que le système répond efficacement aux scénarios d'usage prévus, notamment la gestion des capteurs environnementaux et l'exécution des commandes envoyées aux actionneurs. Cette approche garantit une détection précoce des erreurs et permet des ajustements avant le déploiement final du système [49].

Les résultats des tests ont confirmé le bon fonctionnement des fonctionnalités principales du système. La collecte des données des capteurs de température, d'humidité et de mouvement s'est avérée fiable, avec un taux de transmission des données stable à 99,2 %, selon les logs MQTT capturés via Mosquitto Broker. Les tests de latence ont montré que le temps moyen de réponse des requêtes entre l'ESP32 et le serveur backend était de 220 ms, ce qui garantit une réactivité satisfaisante pour la majorité des cas d'usage.

L'interface web développée en HTML, CSS, Bootstrap et JavaScript a été testée sur plusieurs navigateurs, y compris Chrome, Firefox et Edge, et a affiché un comportement stable avec un temps de chargement moyen de 1,2 seconde pour la récupération des données en temps réel. Ces tests ont permis de valider la conformité du système aux exigences fonctionnelles et de confirmer la cohérence des interactions entre les différents modules du projet [50].

Une fonctionnalité essentielle testée avec succès concerne l'envoi d'alertes par e-mail : en cas de détection de gaz, de flamme ou de bruit suspect, le système déclenche automatiquement une alerte par e-mail à l'adresse préenregistrée de l'administrateur. Cette fonctionnalité a été testée dans différents scénarios critiques et a prouvé sa fiabilité.

De plus, le chatbot multilingue intégré à l'application web a également été validé. Lorsqu'un utilisateur lui pose une question telle que "Quelle est la température de la maison ?", "ما هي درجة حرارة المنزل؟" ou "What is the humidity in the house?", le chatbot répond de manière pertinente dans la langue utilisée, grâce à un traitement intelligent basé sur des fichiers JSON multilingues.

L'analyse des performances a révélé une efficacité élevée du système, bien que certaines limites aient été identifiées. L'ESP8266, par exemple, présente une capacité de traitement inférieure à celle de l'ESP32, ce qui peut engendrer des latences supplémentaires en cas de

surcharge de requêtes. De plus, bien que la transmission des données via le protocole MQTT soit optimisée pour la communication IoT, des interférences Wi-Fi ou des pertes de paquets ont été observées dans des environnements à forte densité de réseaux, réduisant temporairement la fiabilité de la transmission à 96,5 %.

Une autre limitation concerne l'autonomie des microcontrôleurs alimentés sur batterie : une consommation énergétique optimisée a été mise en place via la mise en veille profonde (Deep Sleep Mode), mais l'autonomie reste tributaire de la fréquence de réveil des capteurs. Ces résultats permettent d'envisager des optimisations futures, notamment l'intégration d'algorithmes de gestion d'énergie plus avancés et l'amélioration de la tolérance aux pertes de connexion dans des environnements perturbés [51].

## Conclusion

L'implémentation et la validation du système ont permis d'évaluer la faisabilité technique et la robustesse des solutions mises en place, confirmant ainsi leur adéquation avec les objectifs du projet. La configuration des microcontrôleurs, notamment l'ESP32, l'ESP8266 et l'Arduino, a démontré une intégration fluide avec les capteurs et les modules de communication, assurant une collecte de données fiable et en temps réel. Le développement du backend en Python, associé à des bases de données SQL et des formats d'échange de données tels que JSON et CSV, a permis d'optimiser le stockage et la gestion des informations, garantissant une accessibilité rapide et sécurisée aux données recueillies. En parallèle, l'interface utilisateur, développée avec des technologies web modernes telles que HTML, CSS, Bootstrap et JavaScript, a assuré une interaction intuitive et dynamique avec le système, facilitant ainsi son exploitation par les utilisateurs finaux.

Les tests effectués ont validé la stabilité et l'efficacité du système tout en mettant en évidence certaines limites, notamment en termes de latence de communication et de consommation énergétique des microcontrôleurs en mode continu. Les résultats obtenus, avec un taux de transmission des données de 99,2 % et un temps moyen de réponse des requêtes inférieur à 250 ms, confirment la performance globale du système dans des conditions optimales. Toutefois, des ajustements ont été nécessaires pour pallier certaines contraintes, notamment l'optimisation de la gestion énergétique à l'aide du mode *Deep-Sleep* sur les microcontrôleurs et l'amélioration de la tolérance aux perturbations du réseau Wi-Fi via l'optimisation du protocole MQTT. Ces ajustements ont permis d'améliorer la résilience du système et d'envisager des perspectives d'optimisation futures, telles que l'intégration d'algorithmes avancés de gestion

d'énergie ou l'utilisation d'une connectivité hybride combinant Wi-Fi et LPWAN pour étendre la portée et la stabilité de la transmission des données.

En conclusion, l'implémentation et la validation du système ont confirmé la viabilité du projet en démontrant sa capacité à répondre aux exigences fonctionnelles et techniques définies en amont. Les résultats des tests attestent du bon fonctionnement des différentes couches du système, allant de la collecte des données à leur affichage en temps réel sur l'interface utilisateur. Toutefois, les limitations identifiées soulignent la nécessité d'une optimisation continue, notamment en matière d'efficacité énergétique et de robustesse de communication. Cette phase de réalisation constitue ainsi un jalon essentiel dans le développement du projet, ouvrant la voie à des améliorations futures visant à perfectionner la solution en fonction des besoins évolutifs et des contraintes opérationnelles [52] [53] [50].

## Conclusion Générale

Le projet *Smart Building with AI-Driven Support and IoT Systems* vise à proposer une solution innovante pour l'automatisation et la gestion intelligente des habitations à travers l'intégration de technologies avancées de l'Internet des Objets (IoT), de l'Intelligence Artificielle et du développement web. Ce projet a permis de concevoir et de mettre en place un bâtiment intelligent de trois étages, où chaque maison est équipée de capteurs et d'actionneurs interconnectés pour assurer sécurité, confort et efficacité énergétique. La mise en œuvre technique repose sur des microcontrôleurs ESP32, ESP8266 et Arduino, qui gèrent divers capteurs tels que DHT11 pour la température et l'humidité, MQ135 pour la détection des gaz, un capteur de flamme pour la prévention des incendies, ainsi que des capteurs de mouvement et sonores pour la sécurité du logement [54].

L'infrastructure numérique du projet repose sur une architecture backend développée en Python et SQL, utilisant JSON et CSV pour la gestion des données, et un frontend conçu en HTML, CSS, Bootstrap, JavaScript et jQuery, garantissant une interface fluide et ergonomique [55]. L'application web offre aux résidents un accès exclusif à un chatbot multilingue via une plateforme sécurisée, permettant une interaction intuitive avec le système du bâtiment. L'implémentation des technologies web et embarquées a nécessité une méthodologie rigoureuse de développement et d'intégration, assurant l'interopérabilité des composants et la fiabilité des fonctionnalités.

Les phases de tests et validation ont été cruciales pour évaluer les performances et la stabilité du système. Les résultats ont confirmé une transmission efficace des données entre les capteurs et le serveur, une réponse rapide du chatbot et un contrôle fiable des dispositifs connectés. Néanmoins, des défis ont été rencontrés, notamment la gestion de la consommation énergétique des microcontrôleurs et la résilience du réseau en cas de surcharge. L'optimisation de la communication via MQTT et l'adoption du mode *Deep-Sleep* pour les ESP32 ont permis de réduire significativement ces limitations, rendant le système plus performant et durable [56].

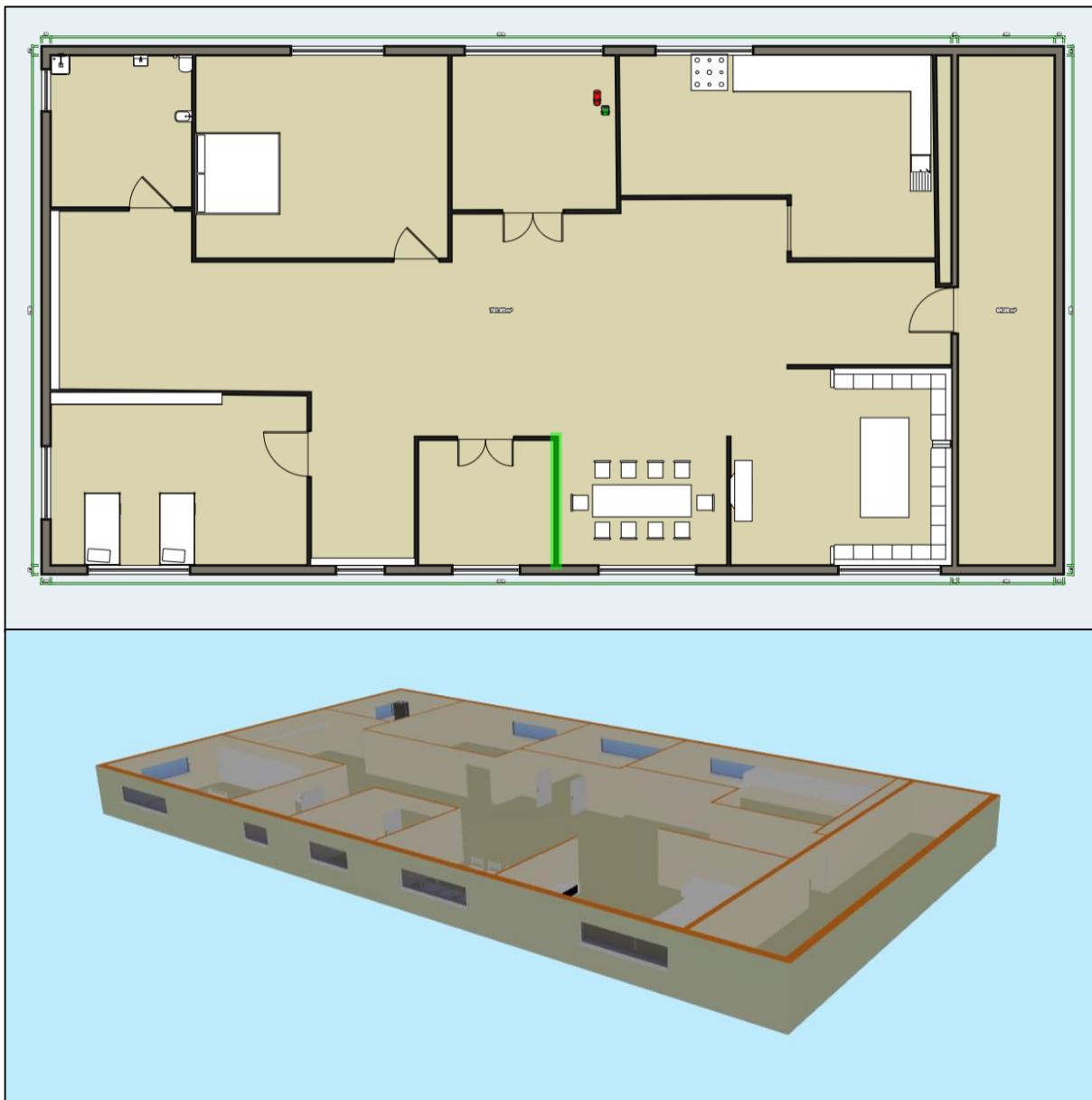
Ce projet représente une avancée significative dans le domaine des bâtiments intelligents, combinant les technologies IoT, l'IA et le développement web pour créer un environnement de vie plus sûr et plus efficace. En perspective, l'intégration d'algorithmes d'apprentissage automatique permettrait d'améliorer l'auto-adaptabilité du système aux habitudes des

résidents, optimisant ainsi la gestion énergétique et la sécurité. De plus, une migration vers une architecture hybride combinant LPWAN et Wi-Fi pourrait améliorer la connectivité et la scalabilité du projet. Cette expérience a renforcé nos compétences en conception de systèmes embarqués, en développement logiciel et en gestion de projet, nous préparant ainsi à relever de futurs défis technologiques dans le domaine de l'ingénierie informatique et des systèmes intelligents.

## Annexes .A.

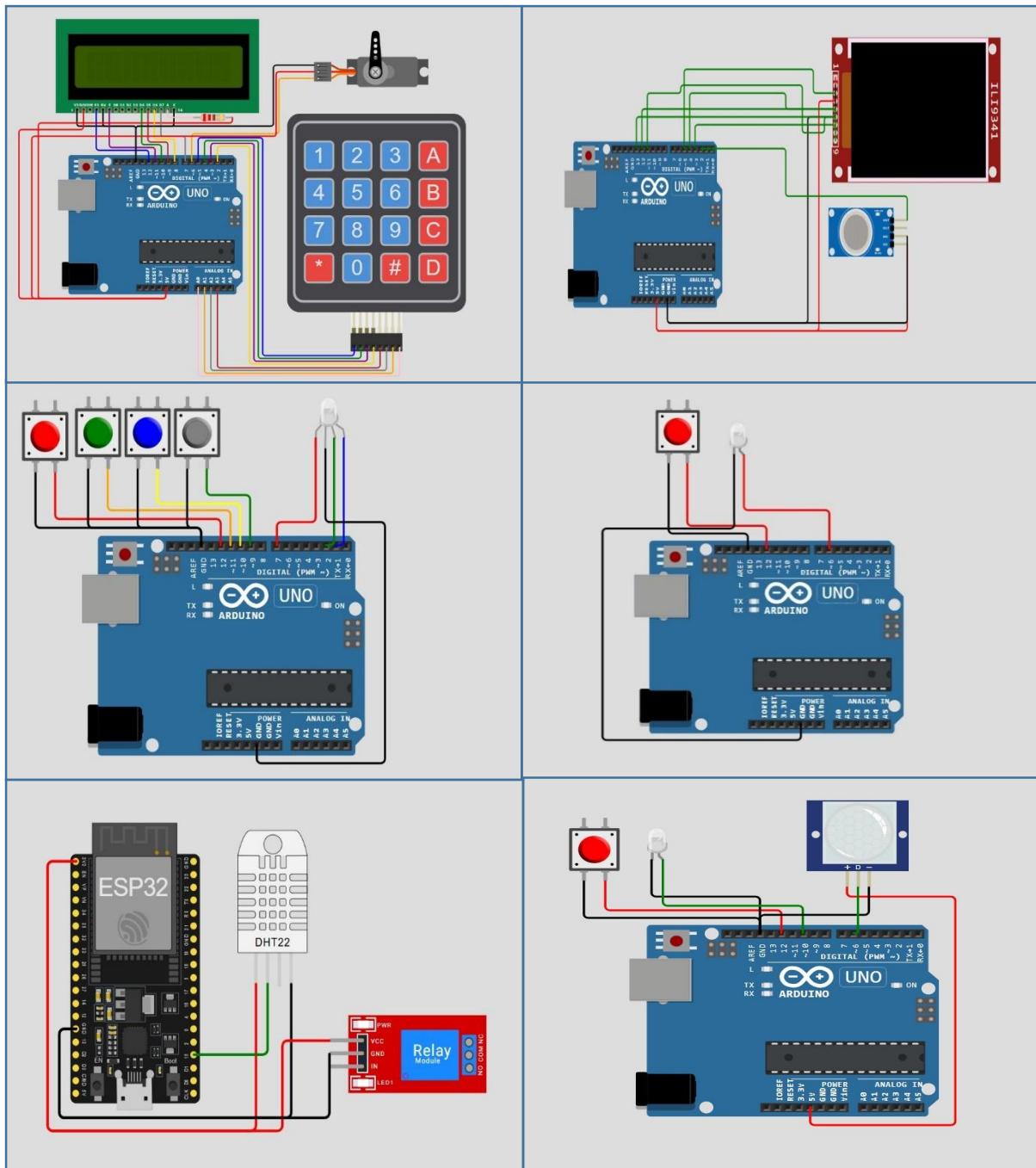
Codes-Sources : [https://github.com/DOUAE-LAMRINI/Chat\\_F](https://github.com/DOUAE-LAMRINI/Chat_F)

Plan d'étage



## Annexes .B.

### Schéma de câblage



## Annexes .C.

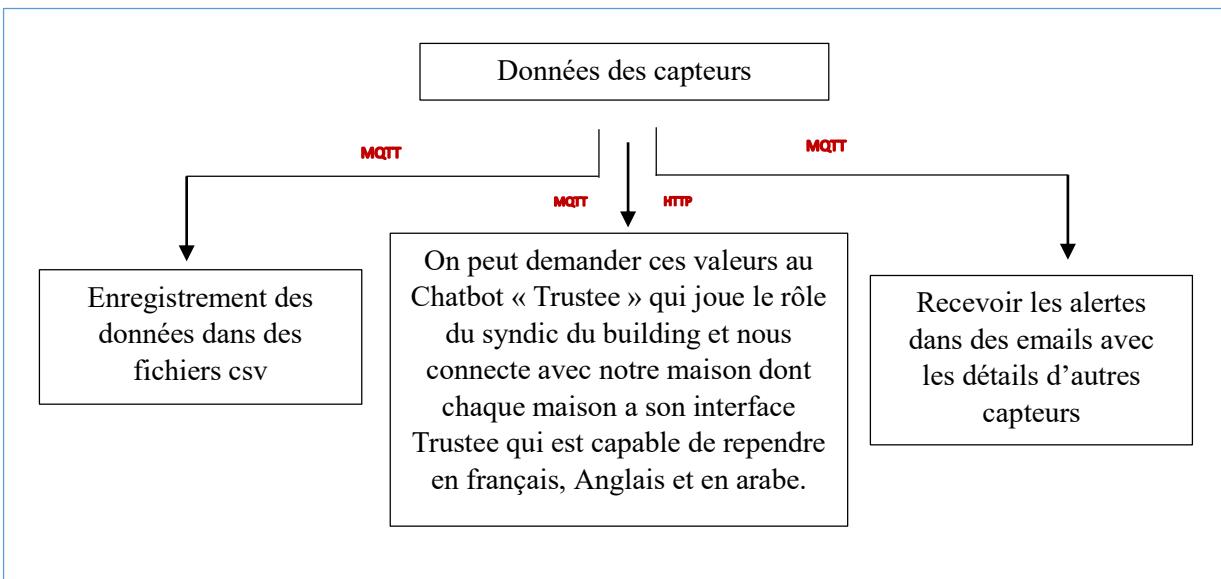
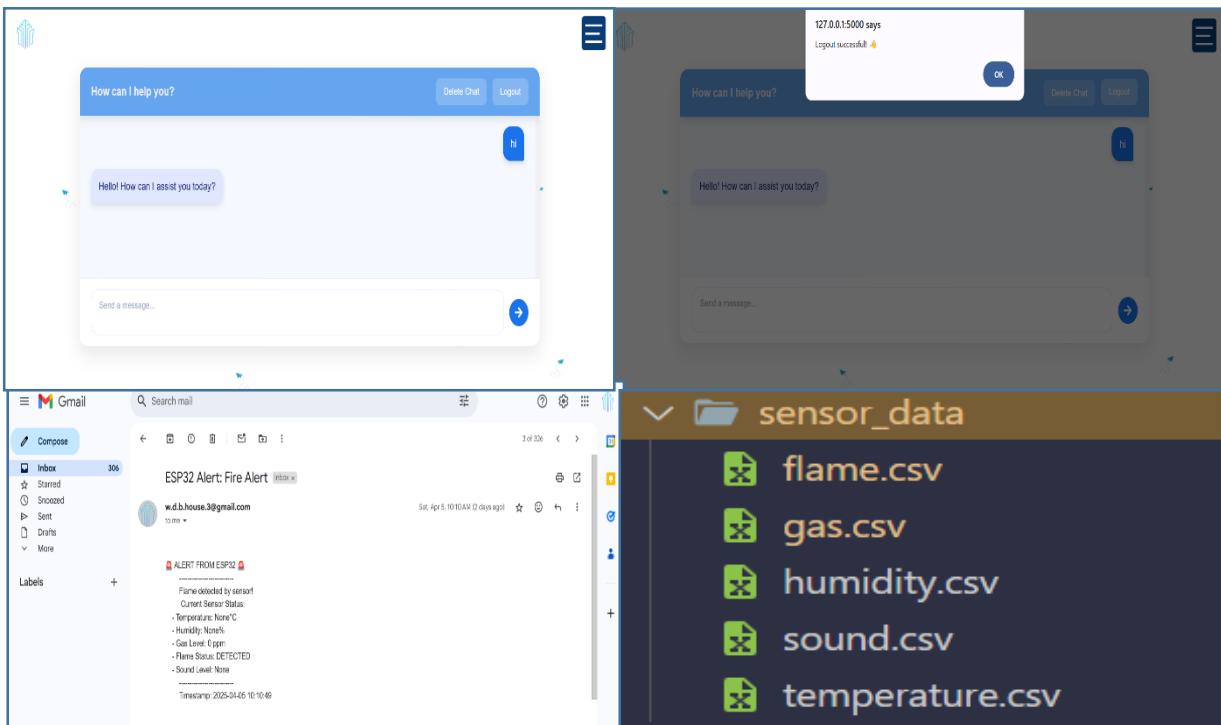
### Le projet en réalité



# Le site web

The image displays a 4x2 grid of screenshots from a website for "W.D.B. CONNECTED HOMES".

- Top Left:** Home page featuring a large banner with the text "W.D.B" and "CONNECTED HOMES".
- Top Right:** A modal window titled "W.D.B" containing a stack of documents.
- Middle Left:** "GUIDE" page with sections for "WHO WE ARE" and "ABOUT OUR PAGE". It includes a form for feedback and two small robot icons.
- Middle Right:** "Important Questions" section with a list of frequently asked questions about the chatbot's usage.
- Bottom Left:** "FEEDBACK" page with a form for users to provide their name, email, house number, feedback, and a rating scale.
- Bottom Right:** "GALLERY" page displaying five images of modern buildings and landscaping.
- Bottom Center:** "SYNDICATE" page showing a login form for users to log in with their house number, username, email, and password.
- Bottom Far Right:** A screenshot of a chatbot interface asking "How can I help you?" with a message input field and a send button.



## Références

- [1] E. Suire, «informatiquenews.fr,» 03 01 2023. [En ligne]. Available: <https://www.informatiquenews.fr/iot-et-ia-quelle-eco-efficacite-pour-le-batiment-intelligent-91300>.
- [2] A. Daissaoui, «theses.fr,» 13 11 2024. [En ligne]. Available: <https://theses.fr/s222750>.
- [3] «Vaia,» [En ligne]. Available: <https://app.vaia.com/studyset/23178014/summary/72108168>.
- [4] F. Whipp, «buildings,» 10 April 2024. [En ligne]. Available: <https://www.buildings.com/smart-buildings/iot/article/55010925/how-iot-sensors-and-ai-are-revolutionizing-smart-buildings>.
- [5] E. Golubovic, «IoT Insider,» 10 January 2025. [En ligne]. Available: <https://www.iotinsider.com/iot-insights/industry-insights/empowering-smart-buildings-through-ai>.
- [6] W. G. III, «Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change,» Cambridge University Press (CUP) – en collaboration avec le GIEC (IPCC)., 2022.
- [7] R. B. ., M. ., M. P. Jayavardhana Gubbi, «Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions,» Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, 2013.
- [8] I. E. A. (IEA), «Energy Efficiency in Buildings,» OCDE/IEA, Paris, France, 2023.
- [9] M. &. M. A. Barr, Programming Embedded Systems: With C and GNU Development Tools, Sebastopol, Californie (États-Unis): O'Reilly Media, 2022 .
- [10] P. A. Laplante, *Real-Time Systems Design and Analysis: Tools for the Practitioner*, Hoboken, New Jersey (États-Unis): Wiley-IEEE Press, 2021 .
- [11] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) et International Organization for Standardization (ISO), *IEEE/ISO/IEC 12207-2017 - Systems and software engineering — Software life cycle processes*, New York, NY (États-Unis), 2017 .
- [12] «nabto,» [En ligne]. Available: <https://www.nabto.com/guide-to-iot-esp-32>.
- [13] «wikipedia,» 30 December 2024. [En ligne]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/ESP\\_Easy](https://en.wikipedia.org/wiki/ESP_Easy).
- [14] L. A. e. A. I. e. G. Morabito, «The Internet of Things: A Survey,» vol. 54, n° %115, p. 2787–2805, 2010.
- [15] R. &. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Hoboken , NJ : Pearson Education, 2020.
- [16] S. Sai, A. Garg, K. Jhawar, V. Chamola et B. Sikdar, *A Comprehensive Survey on Artificial Intelligence for Unmanned Aerial Vehicles*, New York, États-Unis: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2023.

- [17] nexusgroup, «nexus in group,» [En ligne]. Available: <https://www.nexusgroup.com/fr/internet-des-objets-iot-definition>.
- [18] Read Hat, *L'IoT, qu'est-ce que c'est ?*, 2019.
- [19] «Software AG,» [En ligne]. Available: [https://www.softwareag.com/fr\\_fr/resources/iot/guide/internet-of-things.html](https://www.softwareag.com/fr_fr/resources/iot/guide/internet-of-things.html).
- [20] «wikipedia,» [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Web\\_des\\_objets](https://fr.wikipedia.org/wiki/Web_des_objets).
- [21] A. Jahnke, «Digi,» 2020. [En ligne]. Available: <https://fr.digi.com/blog/post/the-4-stages-of-iot-architecture>.
- [22] C. Mathé, «wattsense,» 12 décembre 2023. [En ligne]. Available: <https://www.wattsense.com/fr-fr/blog/gestion-du-batiment/adopter-lot-dans-les-batiments>.
- [23] C. Schwartz, 2024. [En ligne]. Available: <https://fr.digi.com/blog/post/iot-applications-for-smart-buildings-use-cases-and>.
- [24] onetilt, «L'intégration de l'intelligence artificielle dans le BTP,» [En ligne]. Available: <https://www.onetilt.fr/lintegration-de-lintelligence-artificielle-dans-le-btp>.
- [25] N. Ning, «Construction de Chatbots d'IA ChatGPT pour la gestion immobilière : Interview avec l'expert en Chatbot, Jean De Lassé,» 06 May 2024. [En ligne]. Available: <https://www.voc.ai/blog/building-chatgpt-ai-chatbots-for-property-management%3A-interview-w%2F-chatbot-expert%2C-jean-de-lasse%C3%A9-fr-fr>.
- [26] «L'IA et L'IoT : Une synergie puissante pour un monde plus intelligent,» 2024. [En ligne]. Available: <https://elainnovation.com/ia-io>.
- [27] «L'Avenir de l'IoT: Comment l'Intelligence Artificielle Transforme Notre Quotidien,» [En ligne]. Available: <https://kingland.fr/lavenir-de-liot-comment-lintelligence-artificielle-transforme-notre-quotidien>.
- [28] P.-J. Meyer, *Invariance et contrôle symbolique de systèmes coopératifs pour la régulation de température dans les bâtiments intelligents*, 2015.
- [29] C. Ashdown, *Les bâtiments intelligents et leurs besoins en matière de systèmes d'entrée de porte*, 2023.
- [30] Savoir +, *Besoins fonctionnels & Besoins non fonctionnels*.
- [31] M. B. B. C. A. C. M. R. GT 18-4 CIAME SEE, *Capteurs et actionneurs intelligents*, 2005.
- [32] karniishay, «Système Embarqué,» 2024. [En ligne]. Available: <https://www.scribd.com/document/785883930/Systeme-embarque>.
- [33] P. Roques, *Modélisation de systèmes complexes avec sysml*, 2013.
- [34] V. Green, «diagramme-exigence,» 23 2024 . [En ligne]. Available: <https://gitmind.com/fr/diagramme-exigence.html>.

- [35] pedagogie, «DecouverteSysml/co/2DiagCasUtilis,» [En ligne]. Available: [http://pedagogie.ac-limoges.fr/sti\\_si/accueil/SiteSI/2021/Ressources/DecouverteSysml/co/2DiagCasUtilis.html](http://pedagogie.ac-limoges.fr/sti_si/accueil/SiteSI/2021/Ressources/DecouverteSysml/co/2DiagCasUtilis.html).
- [36] sparxsystems, «modeling\_languages/sysml-seq-diagram,» [En ligne]. Available: [https://sparxsystems.fr/enterprise\\_architect\\_user\\_guide/16.1/modeling\\_languages/sysml-seq-diagram.html](https://sparxsystems.fr/enterprise_architect_user_guide/16.1/modeling_languages/sysml-seq-diagram.html).
- [37] «Diagramme\_de\_définition\_de\_bloc,» 2022. [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme\\_de\\_d%C3%A9finition\\_de\\_bloc](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_d%C3%A9finition_de_bloc).
- [38] arduino, «hardware,» [En ligne]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/>.
- [39] espressif, [En ligne]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.
- [40] mqtt, [En ligne]. Available: <https://mqtt.org/>.
- [41] IEEE, [En ligne]. Available: <https://standards.ieee.org/>.
- [42] arduino, «software,» [En ligne]. Available: <https://docs.arduino.cc/software>.
- [43] espressif, «projects/esp-idf/en/latest/esp32,» [En ligne]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/>.
- [44] IEE SA, [En ligne]. Available: <https://standards.ieee.org/>.
- [45] MQTT, [En ligne]. Available: <https://mqtt.org/>.
- [46] IEEE SA, [En ligne]. Available: <https://standards.ieee.org/>.
- [47] Bootstrap, 2024. [En ligne]. Available: <https://getbootstrap.com/docs/5.3/getting-started/introduction/>.
- [48] MDN Web Docs, 2024. [En ligne]. Available: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript>.
- [49] IEEE Software Testing Standards, 2024. [En ligne]. Available: <https://standards.ieee.org/>.
- [50] MDN Web Docs, 2024. [En ligne]. Available: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Performance>.
- [51] espressif, 2024. [En ligne]. Available: [https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/power\\_management.html](https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/power_management.html).
- [52] IEE IOT Journal , [En ligne]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.
- [53] espressif documentations , 2024. [En ligne]. Available: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>.
- [54] Espressif Documentation, [En ligne]. Available: <https://docs.espressif.com>.
- [55] MDN Web Docs, [En ligne]. Available: <https://developer.mozilla.org/en-US>.

[56] IEEE IoT Journal, [En ligne]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.

[57] E. U. A. f. C. (ENISA), «Guidelines on IoT Security,» Publications Office of the European Union, Luxembourg, Luxembourg, 2023.